

Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Werkstoffverhalten von Baustahl

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Florian Jorg Minuth-Hadi
geboren am 27. Januar 1984
aus Berlin

Eingereicht am: 06. Dezember 2017

Disputation am: 14. Mai 2018

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Klaus Thiele
Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge

2018

„Wenn alle Experten sich einig sind, ist Vorsicht geboten.“

Bertrand Russell

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Klaus Thiele für die Initiierung des Forschungsvorhabens sowie die fachliche Unterstützung und Förderung. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilko Flügge danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Koreferats. Ebenso gilt mein Dank Frau Prof. Dr.-Ing. Laura de Lorenzis für die Teilnahme an der Prüfung. Ein Dank gebührt auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß, der stellvertretend für Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann den Vorsitz der Prüfungskommission übernahm.

Ding Cai, Julian Unglaub, Jonas Pons, Dr.-Ing. Thomas Höbbel, Dr.-Ing. Hodei Aizpurua Aldasoro, Dr.-Ing. Arno Kirch und allen weiteren wissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts möchte ich für die Schaffung einer sehr angenehmen Arbeitsatmosphäre danken. Die vielen fachlichen und im Besonderen auch die nicht fachlichen Diskussionen werden mir in sehr guter Erinnerung bleiben. Weiterhin danke ich den Mitarbeitern der Werkstatt und des Labors für die Unterstützung bei der Umsetzung des Versuchsprogramms.

Ein großer Dank gilt meiner Familie und insbesondere meiner Mutter. Ihr danke ich von Herzen für die Ermöglichung und Unterstützung meiner Studienzeit. Ganz besonderer Dank gilt meinen Schwiegereltern, Kerstin und Frank, für Ihre fortwährende Unterstützung und darüber hinaus. Mein größter Dank gilt meiner Frau Christine für Ihre liebevolle Fürsorge, Ihre Geduld, Ihr Verständnis und den liebevollen Rückhalt.

Braunschweig, im Mai 2018

Florian Minuth-Hadi

Kurzfassung

Die Ermittlung von verlässlichen Werkstoffdaten bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten stellt versuchstechnisch noch immer eine große Herausforderung dar, obwohl die Untersuchung der dehnratenabhängigen Beeinflussung des Werkstoffverhaltens von Stahl bereits seit langem Gegenstand der Forschung ist. Zu üblichen Baustählen liegen Untersuchungen bis heute nicht in einem Umfang vor, der für eine für FE-Simulationen taugliche Beschreibung des Materialverhaltens zufriedenstellend wäre.

In dieser Arbeit wurde die dehnratenabhängige Beeinflussung der Festigkeits- und Verformungskennwerte von Baustahl anhand von Zugversuchen unter Variation der Beanspruchungsgeschwindigkeit untersucht. Hierfür wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, der die hohen versuchs- und messtechnischen Anforderungen berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl Festigkeits- als auch Verformungskennwerte der Baustähle teilweise signifikant dehnratenabhängig sind. Dies führt dazu, dass die Fließkurvenform und -lage durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Je nach betrachtetem Dehnratenbereich und Verformungsniveau zeigt die Entwicklung der Festigkeitswerte dabei einen linearen bis stark überproportionalen Anstieg über den Logarithmus der wahren plastischen Dehnrates.

Die Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit wurde in dieser Arbeit anhand der unteren Streckgrenze untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Dehnratenempfindlichkeit mit Abnahme der quasistatischen unteren Streckgrenze und mit Zunahme des mittleren Ferritkorndurchmessers zunimmt. Dabei ist die Trennung der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch die Korngröße und die quasistatische Streckgrenze für die untersuchten Baustähle als problematisch anzusehen. Die Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit über die Kerbschlagarbeit entspricht qualitativ dem Verlauf bei Darstellung über die quasistatische untere Streckgrenze und kann letztlich ebenfalls anhand der Korngröße erklärt werden.

Die in dieser Arbeit untersuchten bestehenden Modelle gehen einem multiplikativen Ansatz nach, der die Dehnratenverfestigung anhand eines Skalierungsfaktors berücksichtigt. Dieser wird jedoch in Abhängigkeit von der betrachteten wahren plastischen Dehnrates bestimmt und ist somit unabhängig von dem betrachteten Verformungsniveau. Die Ermittlung eines Parametersatzes, mit der eine hohe Approximationsgüte für den gesamten Dehnratenbereich und alle Verformungsniveaus

erreicht wird, war für keines der bestehenden Modelle möglich. Das in dieser Arbeit vorgestellte neue Materialmodell verfolgt den Ansatz der Trennung und getrennten Approximation von Fließplateau und Verfestigungskurve bis zur Gleichmaßdehnung mithilfe verschiedener Ansatzfunktionen. Für die Beschreibung der Verfestigungskurve wurden bekannte Verfestigungsmodelle verwendet, deren Modellparameter hinsichtlich ihrer Dehnratenabhängigkeit untersucht und wiederum mithilfe von Ansatzfunktionen approximiert wurden. Dies ermöglicht es, das Verfestigungsverhalten in Abhängigkeit der Dehnrates darzustellen. Umgekehrt wird die Dehnratenverfestigung des Baustahls in Abhängigkeit des betrachteten Verformungsniveaus beschrieben.

Inhalt

Symbole	xiii
----------------	-------------

Glossar	xvii
----------------	-------------

1 Einleitung	1
---------------------	----------

1.1 Motivation und Zielsetzung	1
--------------------------------------	---

1.2 Aufbau der Arbeit	3
-----------------------------	---

2 Kenntnisstand	5
------------------------	----------

2.1 Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit.....	5
---	---

2.1.1 Ermittlung der Dehnrates.....	5
-------------------------------------	---

2.1.2 Streckgrenze.....	6
-------------------------	---

2.1.3 Dehngrenzen und Zugfestigkeit	7
---	---

2.1.4 Verfestigung.....	8
-------------------------	---

2.1.5 Lüdersdehnung.....	9
--------------------------	---

2.1.6 Gleichmaßdehnung	10
------------------------------	----

2.1.7 Bruchdehnung	11
--------------------------	----

2.2 Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit.....	11
---	----

2.2.1 Berechnung der Dehnratenempfindlichkeit	12
---	----

2.2.2 Quasistatische Streckgrenze.....	13
--	----

2.2.3 Mittlerer Korndurchmesser	13
---------------------------------------	----

2.2.4 Kerbschlagarbeit	15
------------------------------	----

2.3 Materialmodelle	16
---------------------------	----

2.3.1 Ludwik / Hollomon.....	17
------------------------------	----

2.3.2 Swift.....	18
------------------	----

2.3.3 Johnson & Cook / Huh & Kang	18
---	----

2.3.4 Cowper & Symonds	21
------------------------------	----

2.3.5 Kühn.....	22
-----------------	----

3	Experimentelle Untersuchungen	27
3.1	Werkstoffauswahl	27
3.2	Basischarakterisierung	30
3.2.1	Mikrostrukturelle Untersuchung	30
3.2.2	Kerbschlagbiegeversuche	32
3.2.3	Zugversuche	34
3.3	Dynamische Charakterisierung	35
3.3.1	Prüfsystem	36
3.3.2	Versuchsaufbau	37
3.3.3	Probengeometrie	38
3.3.4	Kraftmessung	39
3.3.5	Verformungsmessung	40
3.3.6	Messtechnik und Signalaufbereitung	42
3.3.7	Ermittlung der Fließkurven	43
3.3.8	Ermittlung der Dehnraten	44
4	Auswertung und Interpretation	47
4.1	Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit	47
4.1.1	Streckgrenze	47
4.1.2	Dehngrenzen und Zugfestigkeit	52
4.1.3	Verfestigung	55
4.1.4	Lüdersdehnung	58
4.1.5	Gleichmaßdehnung	63
4.1.6	Bruchdehnung	66
4.2	Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit	69
4.2.1	Quasistatische Streckgrenze und mittlerer Ferritkorndurchmesser	71
4.2.2	Kerbschlagarbeit	75
4.2.3	Streckgrenzenverhältnis	77

4.2.4	Ingenieurmodell	78
4.3	Materialmodelle	83
4.3.1	Idealisierte Fließkurven.....	84
4.3.2	Bewertungsmaßstab	86
4.3.3	Johnson & Cook / Huh & Kang	86
4.3.4	Cowper & Symonds	90
4.3.5	Kühn.....	94
4.3.6	Vorschlag eines neuen Modells	96
4.3.7	Diskussion und Modellbewertung	106
5	Abschließende Bemerkungen	111
5.1	Zusammenfassung.....	111
5.1.1	Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit.....	111
5.1.2	Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit.....	112
5.1.3	Modellbildung.....	114
5.2	Ausblick	116
6	Literatur	119
	Anhang	125
A.1	Übersicht der ermittelten Parametersätze	125
A.2	Übersicht der bestimmten Festigkeits- und Verformungskennwerte	130
A.3	Dehnratenabhängige Beschreibung der unteren Streckgrenze	138
A.4	Dehnratenabhängige Beschreibung der Fließkurven.....	141

Symbole

F	Prüfkraft [kN]
T	Prüftemperatur [K]
T_m	Schmelztemperatur [K]
T_R	Raumtemperatur [K]
v_0	Geschwindigkeit des Prüfkolbens [m/s]
L_C	Parallele Länge im verjüngten Probenteil [mm]
L_0	Anfangsmesslänge [mm]
ΔL	Prüfweg [mm]
t	Versuchsdauer [s]
A_0, S_0	Anfangsmessquerschnitt [mm ²]
G	ASTM Korngrößenkennzahl [-]
d	Mittlerer Korndurchmesser [μm]

R_{eL}	Untere Streckgrenze [N/mm ²]
R_{eH}	Obere Streckgrenze [N/mm ²]
$R_{p0,2\%}$	0,2%-Dehngrenze [N/mm ²]
$R_{p1\%}$	1%-Dehngrenze [N/mm ²]
$R_{p3\%}$	3%-Dehngrenze [N/mm ²]
$R_{p4\%}$	4%-Dehngrenze [N/mm ²]
$R_{p6\%}$	6%-Dehngrenze [N/mm ²]
$R_{p8\%}$	8%-Dehngrenze [N/mm ²]
$R_{p10\%}$	10%-Dehngrenze [N/mm ²]
R_m	Zugfestigkeit [N/mm ²]
$t_{R_{p1\%}}$	Versuchsdauer bis zum Erreichen von $R_{p1\%}$ [s]
$t_{R_{p3\%}}$	Versuchsdauer bis zum Erreichen von $R_{p3\%}$ [s]
t_{R_m}	Versuchsdauer bis zum Erreichen von R_m [s]
$A_{Lü}$	Lüdersdehnung [-]
A_{Gl}	Gleichmaßdehnung [-]
A	Bruchdehnung [-]

σ_t	Technische Spannung [N/mm ²]
σ_w	Wahre Spannung [N/mm ²]

σ_f	Fließspannung [N/mm]
σ_{ath}	Athermischer Fließspannungsanteil [N/mm]
σ_{th}	Thermischer Fließspannungsanteil [N/mm]
σ_0^*	Thermischer Fließspannungsanteil bei T = 0 K [N/mm]
σ_{f0}	Quasistatische Fließspannung [N/mm]
σ_0	Startspannung, Reibungsspannung [N/mm]
ΔG_0	Gesamte zur Überwindung eines Hindernisses erforderliche Aktivierungsenergie, „Energieinhalt“ [J]
$\Delta G(\sigma)$	Spannungsabhängige freie Aktivierungsenergie [J]
k	Boltzmann-Konstante [J/K]
$\dot{\epsilon}_{0,G}$	Theoretische Grenzdehnrate, Bezugsdehnrate [1/s]
ϵ_t	Technische Dehnung [-]
ϵ_{pl}	Plastische Dehnung [-]
$\epsilon_{w,pl}$	Wahre plastische Dehnung [-]
$\epsilon_{w,el}$	Wahre elastische Dehnung [-]
$\dot{\epsilon}_{nom}$	Nominelle Dehnrate [1/s]
$\dot{\epsilon}$	Technische Dehnrate [1/s]
$\dot{\epsilon}_{pl}$	Wahre plastische Dehnrate [1/s]
$\dot{\epsilon}_0$	Referenzdehnrate [1/s]
E	Elastizitätsmodul [N/mm]
m_e, β_e	Dehnratenempfindlichkeit [-]
KV(-20°C)	Kerbschlagarbeit bei einer Prüftemperatur von T = -20°C [J]
k_f	Korngrenzenwiderstand nach Hall [35] und Petch [36] [-]
k_L, n_L	Modellparameter nach Ludwik [2] [-]
k_H, n_H	Modellparameter nach Hollomon [41] [-]
k_S, n_S, B_S	Modellparameter nach Swift [42] [-]
A, B, n, C, m	Modellparameter nach Johnson & Cook [4] [-]
A, B, n, C ₁ , C ₂ , m	Modellparameter nach Huh & Kang [46] [-]
D, p	Modellparameter nach Cowper & Symonds [3] [-]
$m_{Kühn}$	Modellparameter nach Kühn [10] [-]
m_{Fit}	Approximierter Modellparameter nach dem Kühn-Modell [10] [-]
aa, ab, ac	Modellparameter zur Beschreibung des Parameters A [-]
ba, bb, bc	Modellparameter zur Beschreibung des Parameters B [-]

ca, cb, cc	Modellparameter zur Beschreibung des Parameters C [-]
ga, gb, gc	Modellparameter zur Beschreibung der Gleichmaßdehnung [-]
ma, mb, mc	Modellparameter zur Beschreibung des Parameters m [-]
ra, rb, rc	Modellparameter zur Beschreibung der unteren Streckgrenze [-]
DF(R _{eL})	Dynamischer Erhöhungsfaktor der unteren Streckgrenze [-]
MV	Mittlere Verfestigung [-]
MV _{Falk}	Mittlere Verfestigung nach Falk [25] [-]
R	Bestimmtheitsmaß [-]
\tilde{x}_i	Messwert
\bar{x}	Mittelwert der Messwerte
\hat{x}_i	Berechneter Wert
n	Anzahl der Messwerte

Glossar

Approximation:

Das iterative Vorgehen, zur Näherung gemessener Werte und Werteverläufe mithilfe von mathematischen Funktionen.

Approximationsgüte:

Das Verhältnis von approximierter Lösung zur exakten Lösung oder zum Messwert.

Dynamometerbereich:

Der Bereich des Probekörpers zur lokalen Kraftmessung mittels Dehnungsmessstreifen.

Dehnung, technische:

Die Längs-Verformung der Probe bezogen auf die ursprüngliche parallele Länge L_C des verjüngten Bereichs der Probe.

Dehnung, wahre:

Die tatsächliche Verformung der Probe unter Berücksichtigung der Querverformung des Probenquerschnitts.

Dehnung, wahre plastische:

Der bleibende (plastische) Anteil der wahren Dehnung.

Dehnrage, Dehngeschwindigkeit:

Die Zunahme der Dehnung je Zeiteinheit.

Dehnrage, nominelle:

Die auf Basis von Prüfkolbengeschwindigkeit v_0 und paralleler Probenlänge L_C bestimmte Dehnrage.

Dehnrage, technische:

Die durch Differenzieren der gemessenen technischen Dehnung bestimmte Dehnrage.

Dehnrage, wahre plastische:

Der Mittelwert des zeitlichen Verlaufs der technischen Dehnrates während des Fließ- bzw. Verfestigungsvorgangs des Zugversuchs.

Dehnratenempfindlichkeit:

Eine Kennzahl zur Beschreibung der dehnratenabhängigen Veränderung einer Messgröße bzw. eines Material - Kennwertes.

Dehnratenverfestigung:

Die allgemeine Festigkeitszunahme infolge einer Erhöhung der Dehnrates.

Korngrenzenverfestigung:

Die allgemeine Festigkeitszunahme infolge einer Erhöhung der Korngrenzenanzahl, bzw. infolge einer Abnahme des mittleren Korndurchmessers.

Kristallgitter:

Die im Allgemeinen regelmäßige Anordnung von bspw. Metallatomen in einer kristallinen räumlichen Struktur.

Korngefüge:

Eine Vielzahl von Kristallgittern, die an ihren Korngrenzen aneinanderstoßen, bilden das Korngefüge.

Proportionalstab:

Eine unter Berücksichtigung eines einheitlichen Proportionalitätsfaktors bestimmte Probengeometrie zur Ermöglichung eines Vergleichs von Bruchdehnungswerten.

Spannung, technische:

Die auf Basis von Prüfkraft und anfänglichem Messquerschnitt bestimmte Spannung.

Spannung, wahre:

Die auf Basis von Prüfkraft und tatsächlicher (aktueller) Querschnittsfläche bestimmte Spannung.

Versetzen:

Eindimensionale, linienförmige Gitterbaufehler im Kristallgitter von bspw. Metallen.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Eine zentrale Aufgabe der Werkstoffwissenschaften ist es, die Auswahl geeigneter Werkstoffe für spezielle Anwendungs- und Belastungsfälle zu erleichtern. Durch die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten für Bauteile aus Stahl ergeben sich je nach Einsatzzweck und -ort unterschiedliche Beanspruchungen. Im Normalfall ist für die Prüfung und Auslegung von Bauteilen und Konstruktionen die Kenntnis der bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelten mechanischen Werkstoffeigenschaften und -kennwerte ausreichend.

In Lastfällen wie beispielsweise Explosion, Anprall oder Erdbeben erfahren Bauteile und Konstruktionen teilweise hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten. Insbesondere für die Abbildung komplexer Strukturen wird die traditionelle Bemessung in zunehmendem Maße durch moderne FE-Simulationen abgelöst. Eine Voraussetzung für möglichst realitätsnahe Simulationsergebnisse sind spezielle Werkstoffmodelle und Modellparameter, die für die genutzten Baustähle angepasst wurden. Idealerweise erfolgt die Anpassung der Modellparameter in Zugversuchen, die das in den entsprechenden Beanspruchungsfällen auftretende Spektrum der Beanspruchungsgeschwindigkeiten abdecken.

Die Ermittlung von verlässlichen Werkstoffdaten bei hohen Beanspruchungsgeschwindigkeiten stellt versuchstechnisch noch immer eine große Herausforderung dar, obwohl die Untersuchung der geschwindigkeitsabhängigen Beeinflussung des Werkstoffverhaltens von Stahl bereits seit langem Gegenstand der Forschung ist. So führte der Engländer John Hopkinson in seiner Arbeit aus dem Jahr 1872 [1] Zugversuche an Eisendrähten durch und stellte einen Anstieg der Fließgrenze bei einer Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit fest. Insbesondere die Erhöhung der Fließgrenze bei hohen Geschwindigkeiten ist somit seit langem beobachtet worden (siehe auch Ludwik [2], Cowper & Symonds [3], Johnson & Cook [4], Weißhaupt [5], Belche [6], Soliman [7], Rees [8], Krabiell [9], Kühn [10], Tanimura et al. [11] und Larour [12]). Diese Untersuchungen wurden entsprechend der im jeweiligen Entstehungsjahr zur Verfügung stehenden Messtechnik durchgeführt. Untersuchungen mit modernen Mitteln, hoher

Zeitauflösung und Messgenauigkeit, sind vor allem für Sonderstähle, insbesondere aus dem Bereich des Automobilbaus durchgeführt worden. Zu üblichen Baustählen, wie S235JR+AR, S355J2+N und S460M nach DIN EN 10025-2 [13] und DIN EN 10025-4 [14], liegen Untersuchungen bis heute nicht in einem Umfang vor, der für eine für FE-Simulationen taugliche Beschreibung des Materialverhaltens zufriedenstellend wäre. Die Beschreibung des dynamischen Materialverhaltens bedingt eine durchgängige Charakterisierung des Werkstoffs über weite Dehnraten- und Temperaturbereiche bei möglichst unverändertem Versuchsaufbau und unter Berücksichtigung einer statistischen Absicherung. Auch neuere Arbeiten beleuchten gezielt Ausschnitte der Thematik sehr hoher Dehnraten und umfassen nicht den gesamten Parameterbereich. Hinzu kommt, dass der Aspekt der Chargenabhängigkeit bisher in sehr wenigen Arbeiten (siehe unter anderem Langseth [15] und Böttcher [16]) berücksichtigt wurde.

Die Beeinflussung von Werkstoffeigenschaften durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit wird üblicherweise anhand der Dehnratenempfindlichkeit bewertet. Die Untersuchung der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit war bislang vor allem auf Sonderstähle beschränkt (siehe Larour [12]). Die Untersuchung der Beeinflussung durch baustahlspezifische Materialeigenschaften, wie beispielsweise durch die Kerbschlagarbeit, ist bislang nicht Gegenstand der Forschung gewesen.

In der Literatur ist eine Vielzahl von Materialmodellen hinsichtlich der Eignung zur Beschreibung des geschwindigkeitsabhängigen Verformungsverhaltens von Baustahl untersucht worden. Eine vergleichende Literaturrecherche zeigt, dass die jeweils untersuchten Stähle nicht immer dem Bauwesen oder im Speziellen dem konstruktiven Stahlbau zuzuordnen sind. Baustahlspezifische Materialeigenschaften, wie beispielsweise das Fließplateau, sind somit nur in wenigen Fällen durch bisher bekannte Materialmodelle berücksichtigt worden.

Die oben aufgeführten Untersuchungen an Baustählen lassen verschiedene Aspekte offen:

- Betrachtung eines weiten Dehnratenbereiches mit konsistentem Versuchsaufbau für den Werkstoff Baustahl.
- Hohe Zeitauflösung und Genauigkeit des gemessenen Kraftsignals und der lokalen Verformungswerte durch moderne Messgeräte.
- Untersuchung des Chargeneinflusses anhand mehrerer Chargen eines Baustahls.

- Untersuchung der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit anhand baustahlspezifischer Werkstoffeigenschaften.
- Beschreibung der dehnratenabhängigen Veränderung von Form und Lage der Fließkurve unter Berücksichtigung baustahlspezifischer Werkstoffeigenschaften.

Diese Aspekte sollen in dieser Arbeit aufgegriffen und anhand der Beantwortung folgender drei Kernfragen bearbeitet werden:

1. Wie wird das mechanische Werkstoffverhalten durch eine Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit verändert?
2. Durch was wird die Veränderung des mechanischen Werkstoffverhaltens infolge der Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst?
3. Lässt sich das Fließ- und Verformungsverhalten von Baustahl mithilfe bestehender Werkstoffmodelle realitätsnah abbilden und welche Modifikationen sind notwendig, damit sie das tun?

1.2 Aufbau der Arbeit

Die thematische Ordnung dieser Arbeit orientiert sich an den drei formulierten Kernfragen. Zu Beginn soll eine Übersicht über den Kenntnisstand der Literatur zu der dehnratenabhängigen Beeinflussung der Festigkeits- und Verformungskennwerte von Baustahl, zu der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch baustahlspezifische Werkstoffeigenschaften sowie zu den wesentlichen für die Thematik relevanten Materialmodellen gegeben werden.

Zur Beantwortung der Kernfragen sollen experimentell ermittelte Daten als Basis dienen. Die Kriterien der Werkstoffauswahl sowie die im Rahmen einer Basis- und einer dynamischen Charakterisierung durchgeführten experimentellen Untersuchungen sind in Kapitel 3 dargestellt. Neben einer mikrostrukturellen und chemischen Analyse zur Bestimmung der Gefügeeigenschaften und der Legierungsbestandteile sollen Kerbschlagbiegeversuche zur Ermittlung der Kerbschlagzähigkeit der Werkstoffe durchgeführt werden. Zur Erfassung des Dehnrateneinflusses sollen quasistatische Standard-Zugversuche sowie Hochgeschwindigkeitszugversuche unter Variation der Beanspruchungsgeschwindigkeit durchgeführt werden.

Das Vorgehen bei der Auswertung der Versuchsergebnisse und die Interpretation hinsichtlich der drei Kernfragen folgen in Kapitel 4. Hierzu sollen die wesentlichen Festigkeits- und Verformungskennwerte in Abhängigkeit der untersuchten Dehnraten dargestellt werden. Um Rückschlüsse auf die Beeinflussung dieser ziehen zu können, sollen die resultierenden Dehnratenempfindlichkeiten in Abhängigkeit verschiedener Parameter dargestellt werden. Abschließend soll die Eignung bestehender Materialmodelle hinsichtlich der Beschreibung der untersuchten Baustähle sowohl untereinander, als auch gegen ein neues Materialmodell verglichen werden.

2 Kenntnisstand

2.1 Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit

2.1.1 Ermittlung der Dehnrates

Die verschiedenen Prüfrichtlinien SEP 1230 [17], FAT 211 [18], ESIS P7-00 [19] wie auch die Norm DIN EN ISO 26203-2 [20] lassen verschiedene Definitionen und Bestimmungsarten von Dehnraten zu. Auf die wichtigsten soll in diesem Abschnitt kurz eingegangen werden.

Die nominelle technische Dehnrates $\dot{\epsilon}_{\text{nom}}$ wird anhand der Belastungsgeschwindigkeit des Prüfkolbens v_0 und der ursprünglichen parallelen Länge L_C des verjüngten Bereichs der Probe (siehe Abbildung 8) bestimmt. Sie entspricht einer globalen Dehnrates, da sie anhand der Prüfkolbengeschwindigkeit berechnet wird und nicht auf Basis einer lokal gemessenen Verformung. Von einer ausschließlichen Verwendung der nominellen technischen Dehnrates $\dot{\epsilon}_{\text{nom}}$ wird von Normenseite sowie in den Prüfeempfehlungen abgeraten. Vielmehr ermöglicht sie vor Beginn einer Versuchsserie eine näherungsweise Bestimmung der erzielbaren Dehnrates mit dem verwendeten Versuchsaufbau.

$$\dot{\epsilon}_{\text{nom}} = \frac{v_0}{L_C} \quad (2.1)$$

Einen weitaus größeren Informationsgehalt liefert die Auswertung des zeitlichen Verlaufs der technischen Dehnrates $\dot{\epsilon}(t)$.

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{d\epsilon(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Nach DIN EN ISO 26203-2 [20] und in Übereinstimmung mit den oben genannten Prüfeempfehlungen wird der Durchschnittswert der technischen Dehnrates $\dot{\epsilon}(t)$ im Bereich der Verfestigung zwischen Erreichen der Streckgrenze, bzw. bei 1 % plastischer Dehnung, und Zugfestigkeit als sogenannte plastische Dehnrates bezeichnet. Diese wird nach [17; 18; 20] auch als charakteristische Dehnrates gesehen.

$$\dot{\varepsilon}_{pl}(t) = \text{Mittelwert} \left\{ \dot{\varepsilon}(t_{R_{p1\%}}) \dots \dot{\varepsilon}(t_{R_m}) \right\} \quad (2.3)$$

Falls bereits kurz nach Fließbeginn die Zugfestigkeit R_m erreicht wird, kann alternativ ein fester Dehnungsbereich zur Bestimmung der plastischen Dehnrates, bspw. zwischen 3 % - und 10 % - Dehngrenze, verwendet werden. Die Bestimmung einer charakteristischen Dehnrates als Mittelwert des zeitlichen Verlaufs der Dehnrates ist sinnvoll, da diese lokal innerhalb der Messlänge und zeitlich über die Versuchsdauer stark variiert.

2.1.2 Streckgrenze

Die in dieser Arbeit untersuchten Werkstoffe sind der Gruppe der kubisch-raumzentrierten Stähle zuzuordnen. Typischerweise zeichnen sich diese durch eine ausgeprägte Streckgrenze aus. Dabei ist zwischen einer oberen Streckgrenze R_{eH} und einer unteren Streckgrenze R_{eL} zu unterscheiden. Im Zugversuch tritt nach Erreichen der Elastizitätsgrenze ein kurzzeitiger Spannungsabfall ein. Das dabei entstehende Spannungsmaximum wird als obere Streckgrenze R_{eH} bezeichnet.

Metallphysikalisch lässt sich das Vorhandensein einer oberen bzw. einer ausgeprägten Streckgrenze nach Stark-Seuken [21] hauptsächlich auf die Neubildung und Vervielfachung von beweglichen Versetzungen zurückführen. Dies wird zum einen durch eine niedrige Anfangsversetzungsdichte und zum anderen durch das Vorliegen von interstitiell gelösten C- und N-Atomen begünstigt. Diese blockieren die Bewegung der Versetzungen bis zum Erreichen einer Spannungsspitze, der oberen Streckgrenze, bei der neue Versetzungen erzeugt und die blockierten Versetzungen gelöst werden. Der sprunghafte Anstieg der Versetzungsdichte wiederum führt zum Abbau der Spannungsspitze auf die untere Streckgrenze, so dass bei weiterer plastischer Verformung eine kleinere Spannung aufgewendet werden muss. Mit Zunahme der plastischen Verformung nimmt die Anzahl blockierter Versetzungen kontinuierlich zu. Bei Erreichen des Verfestigungsbereiches ist die Dichte blockierter Versetzungen so hoch, dass eine weitere plastische Verformung mit einem Spannungsanstieg verbunden ist.

In der Literatur, siehe u. A. Krabiell [9] und Brüninghaus [22], wurde auch für den Werkstoff Baustahl befunden, dass sich die Entwicklung der Fließspannung unter Veränderung der Beanspruchungsgeschwindigkeit mithilfe der Theorie des thermisch aktivierten Fließens erklären lässt. Darauf aufbauende Materialmodelle zur Beschreibung

der unteren Streckgrenze in Abhängigkeit von Prüftemperatur und wahrer plastischer Dehnrates sind bspw. in den Arbeiten von Krabiell [9] und Kühn [10] erarbeitet worden. Als weitere wichtige Arbeiten, in denen die Beeinflussung der Streckgrenze von Baustahl durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit untersucht wurde, sind unter anderem die Arbeiten von Weißhaupt [5], Belche [6], Soliman [7], Rees [8], Larour [12], Hosten [23] und Soliman [7] zu nennen. Eine Vergleichbarkeit ist jedoch nicht immer uneingeschränkt gegeben, da unterschiedliche Definitionen der Streckgrenze, bzw. der Dehnrates vorliegen.

Im Allgemeinen ist jedoch bei üblicherweise verwendeten Baustählen von einer positiven Dehnratesempfindlichkeit auszugehen, d.h. die Streckgrenze steigt mit zunehmender Dehnrates an. Dabei befindet die Literatur überwiegend übereinstimmend, dass der Spannungsanstieg der unteren Streckgrenze bei niedrigen bis moderaten Dehnrates vergleichsweise gering ist und mit Dehnrateszunahme ansteigt. Nach Krabiell [9] kann der Übergang bei $\dot{\epsilon}_{pl} = 1/s$ angenommen werden. Es wird somit von einem überproportionalen Anstieg der unteren Streckgrenze über den Logarithmus der wahren plastischen Dehnrates ausgegangen.

2.1.3 Dehngrenzen und Zugfestigkeit

Entsprechend der positiven Dehnratesempfindlichkeit der Streckgrenze kann auch allgemein von einer Erhöhung der Festigkeitskennwerte bei einer Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit ausgegangen werden. In der Literatur, siehe u. A. Krabiell [9], Böttcher [16] und Lee & Lam [24], wird jedoch für den Werkstoff Baustahl übereinstimmend befunden, dass mit zunehmendem Verformungsniveau eine abnehmende Dehnratesempfindlichkeit einhergeht. Mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit nimmt die Differenz zwischen Streckgrenze und Zugfestigkeit somit ab, während das Streckgrenzenverhältnis R_{eL}/R_m zunimmt.

Bei genauerer Betrachtung der Entwicklung der Dehngrenzen in Abhängigkeit der Beanspruchungsgeschwindigkeit wird deutlich, dass hinsichtlich des betrachteten Verformungsniveaus und Dehnratesbereichs unterschieden werden muss. So befindet Larour [12], dass die Dehnratesempfindlichkeit von 0,2 % zu 5 % wahrer plastischer Dehnung im Mittel um ca. 50 % abnimmt. Zwischen 5 % und 10 % wahrer plastischer Dehnung ist die Abnahme dagegen weitaus geringer.

2.1.4 Verfestigung

Der Verfestigungsbereich eines Stahls mit einer ausgeprägten Streckgrenze beginnt mit der Lüdersdehnung und endet mit der Gleichmaßdehnung, bzw. mit dem Einschnüren der Probe. Die Verfestigung kann metallphysikalisch als kontinuierlicher Anstieg der Anzahl blockierter Versetzungen mit einer einhergehenden Spannungszunahme bei fortschreitender plastischer Verformung gedeutet werden. Bezogen auf die im Zugversuch ermittelte Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist die Verfestigung als Verhältnis $\Delta\sigma_w/\Delta\varepsilon_{w,pl}$ bzw. als Steigung der Kurve zu verstehen. Üblicherweise ist die Verfestigung veränderlich und nimmt mit zunehmender Verformung ab. Dies kann durch das ansteigende Spannungsniveau erklärt werden, wodurch neue Gleitsysteme aktiviert werden. Dies wiederum erleichtert die Bewegung der Versetzungen bzw. das Lösen blockierter Versetzungen.

Wie in den vorhergehenden Abschnitten erläutert wurde, ist davon auszugehen, dass die Dehnratenempfindlichkeit mit zunehmendem Verformungsniveau von Streckgrenze zu Zugfestigkeit abnimmt. Daraus folgt, dass bei einer zunehmenden Beanspruchungsgeschwindigkeit mit einer abnehmenden Verfestigung $\Delta\sigma_w/\Delta\varepsilon_{w,pl}$ zu rechnen ist. Weiterhin wird die Verfestigung auch indirekt durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst. Während bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit die bei plastischer Verformung entstehende Wärme über die Versuchsdauer abgeführt werden kann, ist dies bei hohen Dehnraten und entsprechend kurzen Versuchszeiten nicht problemlos möglich. Es findet ein Übergang von isothermen zu adiabatischen Versuchsbedingungen statt, die zu einer Erwärmung der Probe und bei sehr hohen Dehnraten auch zu einer thermischen Entfestigung führen. Die thermische Entfestigung stellt einen festigkeitsvermindernden Effekt und somit einen gegenläufigen Effekt zur Dehnratenverfestigung dar. Nach Stark-Seuken [21] erschwert dies die Trennung der Fließspannung in einen thermischen und einen athermischen Anteil.

Um das generelle Verfestigungsverhalten verschiedener Stähle in Abhängigkeit der Beanspruchungsgeschwindigkeit beschreiben und untereinander vergleichen zu können, definierte Falk [25] eine mittlere Verfestigung MV_{Falk} :

$$MV_{Falk} = \frac{\Delta\sigma_w}{\Delta\varepsilon_{w,pl}} = \frac{R_m - R_{p1\%}}{A_G - 0,01} . \quad (2.4)$$

Nach Falk nimmt die mittlere Verfestigung bei Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit zunächst leicht zu und fällt dann bei starker Zunahme der Streuung wieder leicht ab. Falk führt dies allein auf die einsetzende Temperaturerhöhung der Probe aufgrund einer adiabatischen Verformung zurück. Tatsächlich nimmt auch Krabiell [9] an, dass ohne aktive Kühlung der Proben bereits bei einer Dehnrate 0,01 /s der Übergang von isothermer zu adiabatischer Verformung stattfindet.

2.1.5 Lüdersdehnung

Zu der Beeinflussung der Lüdersdehnung durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit gibt die Literatur einen überwiegend übereinstimmenden Befund wieder. So ist bei Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit mit einem Anstieg der Lüdersdehnung zu rechnen (vgl. [9], [22], [6], [26], [27], [16]).

Eine mögliche physikalische Deutung der dehnratenabhängigen Veränderung der Lüdersdehnung kann anhand von Überlegungen zur Spannungsverteilung und Energiebilanz im Bereich der Lüdersfront geschehen [6]. Die Zusammenhänge werden ausführlich in der Arbeit von Rees [8] wiedergegeben. Im Allgemeinen geht Rees davon aus, dass eine Erhöhung der Dehngeschwindigkeit den Bereich der Lüdersdehnung verlängert. Nach Krabiell [9] kann dies auf den stärkeren Anstieg der oberen Streckgrenze im Vergleich zur unteren Streckgrenze bei Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit zurückgeführt werden. Van Rooyen [27] geht ebenfalls davon aus, dass das Verhältnis von oberer zu unterer Streckgrenze $\frac{R_{eH}}{R_{eL}}$ als Maß für die Veränderung der Lüdersdehnung genutzt werden. Da die obere Streckgrenze eine höhere Dehnratenempfindlichkeit vorweist, als die untere Streckgrenze, kann somit von einer Zunahme der Lüdersdehnung bei Steigerung der Beanspruchungsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Die experimentelle Ermittlung der oberen Streckgrenze ist jedoch durch den stark streuenden Charakter problembehaftet und weit weniger zuverlässig, als die Auswertung der unteren Streckgrenze. Dies kann nach Krabiell [9] als Folge der Abhängigkeit der oberen Streckgrenze von der individuellen Oberflächenbeschaffenheit der Probe gesehen werden. Die Ausbildung der oberen Streckgrenze ist zudem mit einem exakten Ausrichten der Probe im Versuchsstrang und dem Einstellen eines einachsigen Spannungszustands verbunden.

Nach Brüninghaus [22] und in Übereinstimmung mit Böttcher [16] lässt sich die Lüdersdehnung in einer linear-logarithmischen Beziehung zur wahren plastischen Dehnrate auftragen. Bei Auftragung gegen die untere Streckgrenze lässt sich ein annähernd linearer Zusammenhang feststellen.

2.1.6 Gleichmaßdehnung

Die Gleichmaßdehnung A_{GI} entspricht dem zur Zugfestigkeit R_m gehörenden Wert der wahren plastischen Dehnung. Im technischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm entspricht dies der bleibenden Verformung bei Erreichen des Kraftmaximums. Bis zum Erreichen der Gleichmaßdehnung wird eine gleichmäßige Verteilung der Dehnungen entlang der Probe angenommen. Ebenso wird angenommen, dass die physikalische Verfestigung $\Delta\sigma_w/\Delta\varepsilon_{w,pl} > 0$ und die geometrische Entfestigung infolge der Querschnittsverjüngung $\Delta A/\Delta\varepsilon_{w,pl} < 0$ miteinander im Gleichgewicht sind, das Stabilitätskriterium somit erfüllt ist. Mit zunehmendem Verformungsniveau nimmt die physikalische Verfestigung ab, bis der Anteil der geometrischen Entfestigung überwiegt und sich beide Anteile nicht mehr kompensieren. Die Verformung wird instabil und es kommt zur Einschnürung des Probenquerschnitts [28]. Daraus resultiert ein Absinken der Prüfkraft, wobei die wahre Spannung im sich verjüngenden Prüfquerschnitt stark ansteigt bis die Probe zerreißt.

In der veröffentlichten Literatur herrscht Uneinigkeit über die dehnratenabhängige Entwicklung der Gleichmaßdehnung. Nach Krabiell [9] und in Übereinstimmung mit Böttcher [16] wird die dehnratenabhängige Beeinflussung der Gleichmaßdehnung maßgeblich durch die Dehnratenverfestigung und die thermische Entfestigung gesteuert. Demnach ist keine allgemeingültige Aussage möglich. Tendenziell kann allerdings von einer Verringerung der Gleichmaßdehnung infolge ansteigender Dehnraten ausgegangen werden. Dies kann nach Krabiell durch die unterschiedliche Beeinflussung von physikalischer Verfestigung und geometrischer Entfestigung durch die Dehnrate begründet werden. Demzufolge wird die Verfestigung nur wenig durch die Dehnrate beeinflusst. Die geometrische Entfestigung dagegen nimmt mit zunehmendem Spannungsniveau zu, wodurch das Gleichgewicht zwischen beiden Anteilen mit zunehmender Dehnrate zu kleineren Verformungen verschoben wird. Die Instabilitätsbedingung und somit der Punkt, an dem das Stabilitätskriterium nicht mehr erfüllt ist, wird somit früher erreicht. Der Befund nach Forni et al. [29] steht somit teilweise im Widerspruch zu oben dargestellten Arbeiten. Bezüglich der

Gleichmaßdehnung wurde ein Anstieg der Gleichmaßdehnung bis zu einer wahren plastischen Dehnrates $\dot{\varepsilon}_{pl} = 300/s$ mit einer anschließenden Verringerung beobachtet.

2.1.7 Bruchdehnung

Die Bruchdehnung wird im Zugversuch bei quasistatischer wie auch bei dynamischer Beanspruchung üblicherweise nach dem Zugversuch anhand der verbleibenden Längsverformung der Probe bestimmt (vgl. [30], [20]). Sie wird durch die Probengeometrie, im Besonderen durch die ursprüngliche Messlänge L_0 und durch die Form und die Fläche des Probenquerschnitts, beeinflusst. Um Bruchdehnungen untereinander vergleichen zu können, wird daher vielfach eine Probengeometrie verwendet, die einem Proportionalstab entspricht. Für eine Flachprobe ist die Anfangs-Messlänge L_0 in Abhängigkeit der Fläche des Anfangs-Querschnitts S_0 demnach wie folgt zu bestimmen:

$$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0} \quad (2.5)$$

Zu der Beeinflussung der Bruchdehnung durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit gibt die Literatur einen überwiegend übereinstimmenden Befund wieder. So ist bei Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit mit einem Anstieg der Bruchdehnung zu rechnen. Krabiell [9] kommt in Übereinstimmung mit Böttcher [16] zu dem Erkenntnis, dass die Bruchdehnung ferritischer Stähle unter dem Einfluss zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeiten zunimmt. Falk [25] befindet für die Bruchdehnung ein ähnliches dehnratenabhängiges Verhalten wie für die Gleichmaßdehnung. Die Brucheinschnürung Z dagegen sieht er in Übereinstimmung mit Krabiell [12] und Brüninghaus [22] nicht durch die Dehnrates beeinflusst. Forni et al. [29] befinden für die Bruchdehnung gleichermaßen wie für die Gleichmaßdehnung einen Anstieg bis zu einer wahren plastischen Dehnrates $\dot{\varepsilon}_{pl} = 300/s$ mit einer anschließenden Verringerung bei weiterer Steigerung der Beanspruchungsgeschwindigkeit.

2.2 Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit

Die ersten Untersuchungen zur Dehnratenempfindlichkeit fanden im Bereich der Umformtechnik statt. Um den Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf eine bestimmte Spannung, wie beispielsweise die untere Streckgrenze, in Form eines

Kennwerte beschreiben zu können, wird üblicherweise die Dehnratenempfindlichkeit bestimmt. Die Dehnratenempfindlichkeit beschreibt die relative Veränderung der Spannung über den Logarithmus der Dehnrate. Bei positiver Dehnratenempfindlichkeit geht somit eine Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit mit einer Spannungszunahme einher. Die Dehnratenempfindlichkeit stellt somit einen leicht interpretierbaren Kennwert dar. Dieser Abschnitt soll den aktuellen Kenntnisstand früherer Untersuchungen zur Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit der Streckgrenze durch bereits bekannte Werkstoffkennwerte und andere Parameter darstellen.

2.2.1 Berechnung der Dehnratenempfindlichkeit

In der Literatur werden verschiedene Definitionen der Dehnratenempfindlichkeit eines Werkstoffs vorgeschlagen. Eine Übersicht gibt beispielsweise Larour [12] wieder. Die Unterschiede der Ansätze beschränken sich im Wesentlichen auf die Darstellung der relativen Veränderung der Spannung über der Dehnrate. In der Praxis werden üblicherweise folgende zwei Definitionen verwendet ([31], [32]):

$$\beta_e = \delta \sigma / \delta \ln(\dot{\epsilon}) \quad (2.6)$$

$$m_e = \delta \ln(\sigma) / \delta \ln(\dot{\epsilon}) \quad (2.7)$$

Die geschwindigkeitsabhängige Untersuchung der Entwicklung von Parametern wird im Regelfall über den natürlichen Logarithmus der Dehnrate dargestellt. Es wird bei den oben angegebenen Definitionen somit von einer abschnittsweise logarithmisch-linearen Beziehung ausgegangen. In Bezug auf die in bisherigen Untersuchungen ermittelten Entwicklungen der Streckgrenze über die Dehnrate ist allerdings eher von einer logarithmisch-quadratischen Beziehung auszugehen. Die für die untersuchten Dehnraten bestimmten Dehnratenempfindlichkeiten sind somit nicht konstant, sondern über den untersuchten Dehnratenbereich veränderlich. Auch Larour [12] geht davon aus, dass die Dehnratenempfindlichkeit nicht als konstanter Werkstoffkennwert angesehen werden kann, sondern sowohl von dem betrachteten Dehnratenbereich als auch von dem Verformungsniveau abhängig ist. Eine mögliche Vorgehensweise ist die Unterteilung in mehrere Dehnratenbereiche und die abschnittsweise Bestimmung der jeweils charakteristischen Dehnratenempfindlichkeiten jeweils für die untersuchten Verformungsniveaus bzw. für die zugehörigen Festigkeiten.

2.2.2 Quasistatische Streckgrenze

Über den Einfluss der quasistatischen Streckgrenze gibt die Literatur mehrheitlich wieder, dass die Dehnratenempfindlichkeit mit zunehmendem Festigkeitsniveau abnimmt (vgl. [12], [9], [10], [33], [34]). Arbeiten, in denen anhand verschiedener Chargen einer Stahlgüte der alleinige Einfluss der quasistatischen Streckgrenze auf die Dehnratenempfindlichkeit untersucht wurde, sind dem Autor jedoch nicht bekannt. Oftmals werden innerhalb eines Versuchsprogramms Stähle mit unterschiedlichen Festigkeits- und Gefügeeigenschaften, teils auch aus unterschiedlichen Herstellverfahren, hinsichtlich ihres geschwindigkeitsabhängigen Werkstoffverhaltens untersucht. Eine isolierte Betrachtung einzelner beeinflussender Parameter ist auf diese Weise nicht möglich. So vergleicht bspw. Krabiell [9] drei ferritisch-perlitische Stähle C10, St 52-3 und StE 47, die sich durch Kohlenstoff- und Mikrolegierungselementgehalt unterscheiden und somit verschiedene Festigkeiten und Korngrößen aufweisen. Krabiell führt aus, dass bei ähnlichem Gefüge dennoch ein gemischter Vergleich hinsichtlich der Dehnratenempfindlichkeit möglich ist, und kommt zu dem Schluss, dass weiche Stähle eine höhere Dehnratenempfindlichkeit aufweisen als höherfeste Feinkornbaustähle. Stark-Seuken [21] untersuchte in seiner Arbeit das geschwindigkeitsabhängige Verhalten verschiedener ferritischer Sonderstähle. Auch er kommt zu der Schlussfolgerung, dass weiche Stähle eine stärkere Streckgrenzenzunahme aufweisen als vergleichsweise höherfeste Stähle. Dieser Befund wird durch Kühn [10] für verschiedene Baustähle, darunter St 37-3, St 52-3, StE 460N und StE 420TM, bestätigt. Demnach nimmt die Dehnraten- und Temperaturempfindlichkeit mit zunehmender Festigkeit ab, wobei auch Kühn nicht davon ausgeht, dass es sich hierbei um einen Alleinmechanismus handelt und neben der quasistatischen Streckgrenze weitere Einflüsse bestehen.

Da die quasistatische Streckgrenze durch den mittleren Korndurchmesser beeinflusst wird, ist zu vermuten, dass eine isolierte Untersuchung der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch die quasistatische Streckgrenze und den mittleren Korndurchmesser nicht sinnvoll ist.

2.2.3 Mittlerer Korndurchmesser

Korngrenzen sind als flächige Gitterfehler zu sehen, die beim Erstarren der Schmelze dort entstehen, wo die wachsenden Kristallkeime zusammenstoßen. Nach Hall [35] und Petch [36] stellen Korngrenzen Hindernisse für Versetzungen dar, d.h. eine Verkleinerung der

Korngröße führt zu einer Vergrößerung des Volumenanteils der Korngrenzen im Material und somit zu einer Erhöhung der Streckgrenze.

Hall und Petch befanden in ihren Arbeiten, dass sich Korngröße, bzw. mittlerer Korndurchmesser, und Festigkeitssteigerung $\Delta\sigma$ in einem linearen Zusammenhang darstellen lassen. Trägt man die Fließspannung σ_f über die reziproke Wurzel des mittleren Korndurchmessers d auf, lässt sich die Beziehung durch eine Gerade, bzw. durch die sogenannte Hall-Petch-Gleichung beschreiben:

$$\sigma_f = \sigma_0 + \Delta\sigma = \sigma_0 + k_f \cdot d^{-1/2}. \quad (2.8)$$

Dabei stellt die Startspannung σ_0 , auch Reibungsspannung, die für den Beginn der Versetzungsbewegung notwendige Spannung dar. Der Parameter k_f stellt die Steigung der Geraden dar und steht somit für den Korngrenzenwiderstand des Werkstoffs. Eine Darstellung der Hall-Petch-Beziehung zeigt Abbildung 1.

Die Fließspannung nimmt nach der Hall-Petch-Gleichung mit abnehmender Korngröße zu. Entsprechend Abschnitt 2.2.2 kann somit bei einer Abnahme des mittleren Korndurchmessers von einer Zunahme der Fließspannung und somit von einer Abnahme der Dehnratenempfindlichkeit ausgegangen werden. Dies entspricht einer indirekten Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch die Korngröße. Für eine Übersicht der wesentlichen Arbeiten, die die direkte Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch die Korngröße untersuchen, sei auf die Arbeiten von Rees [8] und Bruce [33] verwiesen.

Über den Einfluss der Dehnraten auf den Korngrenzenwiderstand, bzw. den Parameter k_f , ist sich die Literatur uneins. Die Mehrheit der Arbeiten jedoch kommt zu dem Befund, dass der Korngrenzenwiderstand als konstant über die Beanspruchungsgeschwindigkeit anzusehen ist (vgl. [12], [33]). In Bezug auf die Startspannung σ_0 befindet Rees [8] in Übereinstimmung mit Weber [34] und Campbell & Harding [37], dass diese bei Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit ansteigt. Dies folgt aus der Beobachtung, dass die Steigung der Geraden nicht durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Das lässt den Schluss zu, dass die Zunahme der Fließspannung bei Erhöhung der Dehnraten allein durch eine Zunahme der Startspannung σ_0 begründet ist.

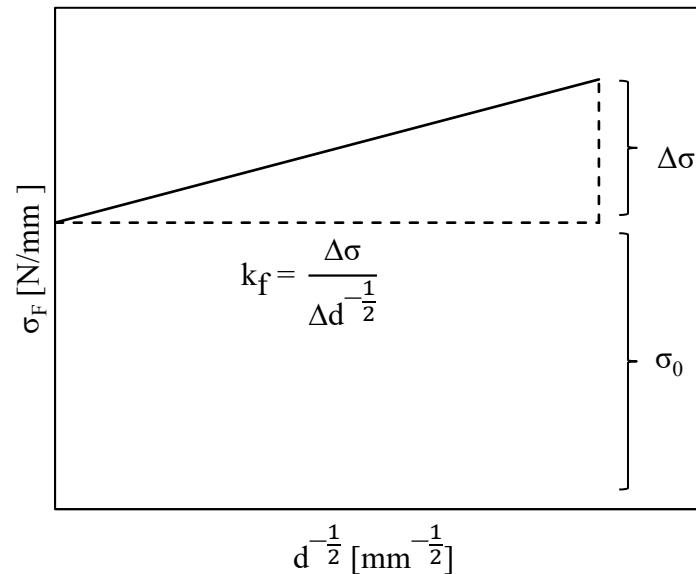


Abbildung 1: Darstellung der Hall-Petch-Beziehung.

Auch Larour [12] befindet, dass die Startspannung σ_0 durch die Dehnraten beeinflusst wird, während er den Korngrenzenwiderstand k_f als unabhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit sieht. Insgesamt befindet er die Dehnratenempfindlichkeit als nicht von der Korngröße abhängig. In der Arbeit von Tsuchida [38] wird diese Annahme geteilt. Er befindet den Effekt der Korngrößenverfestigung als nicht durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst. Die Dehnratenempfindlichkeit befindet er zudem als weitgehend unabhängig von dem mittleren Ferritkorndurchmesser. Dies kann anhand der Theorie des thermisch aktivierten Fließens erklärt werden, nach der Korngrenzen als weitreichende Hindernisse gelten, die nicht durch thermisch aktivierbare Mechanismen überwunden werden können.

2.2.4 Kerbschlagarbeit

Die Kerbschlagarbeit wird in dieser Arbeit als integraler materialspezifischer Kennwert gesehen, der für eine Vielzahl materialspezifischer Eigenschaften steht, die als beeinflussende Parameter der Dehnratenempfindlichkeit gelten. Hierzu gehören als charakteristische Werkstoffkennwerte die untere Streckgrenze und das Streckgrenzenverhältnis sowie der mittlere Korndurchmesser, der als maßgebende Gefügekennggröße angesehen wird. Es ist zu beachten, dass keine direkte Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch die Kerbschlagarbeit stattfindet. Vielmehr wird die Kerbschlagarbeit durch einige Werkstoffeigenschaften beeinflusst, von denen

ausgegangen wird, dass diese in ähnlicher Weise einen Einfluss auf die Dehnratenempfindlichkeit ausüben. Es kann daher vermutet werden, dass sich die Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit der untersuchten Baustähle in Abhängigkeit der Kerbschlagarbeit darstellen lässt.

Im Gegensatz zu der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch die quasistatische Streckgrenze ist über die Beeinflussung durch die Kerbschlagarbeit nur wenig bekannt. Lediglich Kühn [10] untersuchte in seiner Arbeit zwei Baustähle aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren, einen StE 420 und einen StE 460 (vgl. [9]), und zog einen Rückschluss auf den Einfluss der Zähigkeit. Trotz ähnlicher Festigkeitswerte zeigte sich, dass der thermomechanisch gewalzte Baustahl StE 420 eine geringere Dehnratenempfindlichkeit der Streckgrenze besaß, als der normalisierte StE 460. Nach Kühn scheint eine gezielte Vergütung und/oder eine höhere Legierung zu einer abnehmenden Dehnratenempfindlichkeit zu führen, wobei aufgrund der Datenlage nicht geklärt werden konnte, ob allein die thermomechanische Behandlung, das dazugehörige Legierungskonzept bzw. einzelne Legierungsanteile oder das daraus resultierende Korngefüge des Stahls ausschlaggebend für die Ausprägung der Dehnratenempfindlichkeit ist.

2.3 Materialmodelle

Seit vielen Jahren werden Materialmodelle entwickelt, bzw. bestehende Modelle erweitert, um das Materialverhalten auch unter Berücksichtigung der Beanspruchungsgeschwindigkeit abbilden zu können (siehe u. a. [10], [23], [3], [4], [11], [39], [40]). Grundsätzlich können die Modelle in zwei Kategorien unterteilt werden: Empirische Modelle dienen oft zur mathematischen Beschreibung experimentell ermittelter Daten. Im Gegensatz zu den metallphysikalischen Modellen basieren diese nicht auf den zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen, bzw. sind diese nicht bekannt oder von Interesse. Vorteilhaft an der rein empirischen Betrachtungsweise ist, dass keine mitunter einschränkend wirkenden metallphysikalischen Gesetzmäßigkeiten berücksichtigt werden müssen, sondern lediglich der zur Abbildung der Versuchsdaten mathematisch beste Lösungsansatz. Daneben existieren sogenannte semi-empirische Materialmodelle, die teilweise auf metallphysikalischen Überlegungen basieren, jedoch auch empirisch ermittelte Parameter oder Terme enthalten.

In diesem Abschnitt sollen zunächst die wesentlichen empirischen Modelle zur Beschreibung der wahren Spannung in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnung bei einer konstanten, quasistatischen Beanspruchungsgeschwindigkeit vorgestellt werden. Hierbei handelt es sich um die Materialmodelle nach Ludwik [2] und Hollomon [41] (siehe Abschnitt 2.3.1) sowie um das Modell nach Swift [42] (siehe Abschnitt 2.3.2).

Im Anschluss werden die wichtigsten empirischen Ansätze vorgestellt, die zusätzlich den Einfluss der wahren plastischen Dehnrate berücksichtigen. Die Materialmodelle nach Johnson & Cook [4] (siehe Abschnitt 2.3.3) und Cowper & Symonds [3] (siehe Abschnitt 2.3.4) sind weit verbreitet und oftmals bereits in den gängigen FE-Programmen implementiert. Dagegen spielen die metallphysikalisch basierten und auch semi-empirischen Modelle bei der Verwendung in kommerzieller FE-Software keine nennenswerte Rolle. Dennoch soll das Materialmodell nach Kühn [10] (siehe Abschnitt 2.3.5) in die Untersuchungen mit einbezogen werden, da die zugrunde liegenden Mechanismen und Ansätze insbesondere für die Untersuchung der Dehnratenempfindlichkeit von Bedeutung sind.

2.3.1 Ludwik / Hollomon

Die Historie der Verwendung der Potenzfunktion zur Beschreibung mechanischer Vorgänge geht bis in das 16. Jahrhundert zurück. Gottfried Wilhelm Leibniz untersuchte 1684 den Zusammenhang zwischen Zugkraft und resultierender Verformung und schlug zur Beschreibung eine Potenzfunktion vor [43]. Ludwik führte 1909 in seiner Arbeit *Elemente der Technologischen Mechanik* [2] die Beziehung zwischen wahrer Spannung σ_w und wahrer plastischer Dehnung $\varepsilon_{w,pl}$ unter dem Begriff der Fließkurve ein. Die Entwicklung der wahren Spannung beschreibt er ausgehend von einer Anfangsfließspannung σ_0 und in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnung mithilfe einer Potenzfunktion unter Verwendung der Modellparameter k_L und n_L . Die Formulierung geht dabei von konstanter Dehngeschwindigkeit (oder Dehnratenunabhängigkeit des Werkstoffs) und konstanter Prüftemperatur aus:

$$\sigma_w(\varepsilon_{w,pl}) = \sigma_0 + k_L \cdot (\varepsilon_{w,pl})^{n_L} . \quad (2.9)$$

Der Exponent n_L beeinflusst maßgeblich die Steilheit der Fließkurve und gilt somit als Maß der Verformungsverfestigung des Materials. In der Literatur wird daher auch der Begriff Verfestigungsexponent verwendet.

Hollomon [41] vereinfachte die Ludwik-Gleichung, indem er die Anfangsfließspannung σ_0 aus der ursprünglichen Formulierung vernachlässigte:

$$\sigma_w(\varepsilon_{w,pl}) = k_H \cdot (\varepsilon_{w,pl})^{n_H} . \quad (2.10)$$

Dies führt dazu, dass bei Dehnungen $\varepsilon_{w,pl} \rightarrow 0$ entsprechende Spannungen $\sigma_w \rightarrow 0$ resultieren. Im Hinblick auf Stähle mit einer ausgeprägten Streckgrenze scheint dieser Ansatz somit für die Beschreibung der Fließkurve bei kleinen Verformungen ungeeignet zu sein. Der Hollomon-Ansatz ist dennoch ein weit verbreitetes Verfestigungsmodell, das insbesondere in der Umformtechnik verwendet wird.

Die Hollomon-Gleichung wird oft synonym als Ludwik-Gleichung bezeichnet. In dieser Arbeit sollen beide Ansätze für sich stehen und getrennt behandelt werden.

2.3.2 Swift

Der Ansatz nach Swift [42] lässt sich auf einen Hollomon-Term mit einem zusätzlichen Modellparameter B_S zurückführen:

$$\sigma_w(\varepsilon_{w,pl}) = k_S \cdot (B_S + \varepsilon_{w,pl})^{n_S} . \quad (2.11)$$

Nach Belche [6] wird der Ansatz oft bei einer vorliegenden Vorverformung verwendet und entspricht somit einer Verschiebung der Fließkurven parallel zur x-Achse im Spannungs-Dehnungs-Diagramm. Auch wenn die vorliegende Arbeit keine Untersuchungen mit Vorverformungen einschließt, soll die Formulierung nach Swift als Ansatzfunktion in Abschnitt 4.3.6 untersucht werden.

2.3.3 Johnson & Cook / Huh & Kang

Johnson & Cook [4] beschreiben die Entwicklung der Vergleichsspannung nach von Mises in Abhängigkeit von der wahren plastischen Dehnung, der wahren plastischen

Dehnrates und der Prüf- und Schmelztemperatur mithilfe eines rein phänomenologischen Werkstoffmodells. Basis ist eine mathematische Beschreibung des Werkstoffverhaltens durch Modellparameter, die auf rein empirisch gewonnenen Erkenntnissen beruhen. Mikrostrukturbasierte Effekte werden somit nicht direkt berücksichtigt. Die geringe Anzahl der zu bestimmenden Modellparameter sowie die Einfachheit der Parameterbestimmung sind dabei als Gründe für die weite Verbreitung und Akzeptanz des Modells zu benennen. Die Gleichung zur Bestimmung der Fließspannung kombiniert den bekannten Ludwik-Term (vgl. Abschnitt 2.3.1) zur Berücksichtigung des Fließ- und Verfestigungsverhaltens in einem multiplikativen Ansatz mit zwei weiteren Termen zur Berücksichtigung der wahren plastischen Dehnrates und der Prüf- und Schmelztemperatur:

$$\sigma_w(\varepsilon_{w,pl}, \dot{\varepsilon}_{pl}) = (A + B \cdot \varepsilon_{pl,w}^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right). \quad (2.12)$$

Der erste Term beschreibt die wahre Spannung in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnung durch einen Ludwik-Term. Der Modellparameter A steht dabei für die bei der Referenzdehnrates $\dot{\varepsilon}_0$ ermittelte Fließspannung. Die Modellparameter B und n beschreiben in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnung das Verfestigungsverhalten des Materials. Die dehnratesabhängige Verfestigung wird im zweiten Term durch den Modellparameter C sowie den Bezug der wahren plastischen Dehnrates $\dot{\varepsilon}_{pl}$ zu der Referenzdehnrates $\dot{\varepsilon}_0 = 1/s$ beschrieben. Im dritten Term wird der Einfluss der thermischen Entfestigung durch lineare Interpolation zwischen Prüftemperatur T, Raumtemperatur T_r und Schmelztemperatur T_m sowie durch den Exponenten m beschrieben.

Johnson & Cook [4] gehen somit von einer linearen Abhängigkeit der wahren Spannung über den Logarithmus der wahren plastischen Dehnrates aus. Dies entspricht einer konstanten Dehnratesempfindlichkeit unabhängig vom betrachteten Dehnratesbereich. In verschiedenen Arbeiten (siehe [12] und [10]) zeigte sich bereits, dass diese Annahme für Baustähle nicht zutreffend ist und von einer mit zunehmender Dehnrates ansteigenden Dehnratesempfindlichkeit auszugehen ist. Auch Rohr [44] befindet, dass der linear-logarithmische Ansatz sowie die zugrundeliegenden Modellannahmen für wahre plastische Dehnrates größer $\dot{\varepsilon}_{pl} = 10^4/s$ nicht zutreffend bzw. zumindest diskussionsbedürftig sind.

In der Literatur finden sich bereits zahlreiche Modifikationen der ursprünglichen Formulierung, die diesen Aspekt aufgreifen. So fügten Rule & Jones [45] einen gewichteten Summand hinzu, der eine ansteigende Dehnratenempfindlichkeit bei wahren plastischen Dehnraten $\dot{\epsilon}_{pl} > 10^3/s$ berücksichtigt. Die Modifikation nach Huh & Kang [46] ist weit verbreitet und berücksichtigt die ansteigende Dehnratenempfindlichkeit in Form eines zusätzlichen, ebenfalls gewichteten Terms quadratischer Ordnung (siehe Gleichung (2.13)).

$$\sigma_w(\epsilon_{w,pl}, \dot{\epsilon}_{pl}) = (A + B \cdot \epsilon_{pl,w}^n) \cdot \left(1 + C_1 \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) + C_2 \ln^2\left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^m\right). \quad (2.13)$$

Sowohl bei der ursprünglichen Formulierung wie auch bei den Modifikationen handelt es sich um ungekoppelte, multiplikative Ansätze. Das dehnratenabhängige Verfestigungsverhalten ist somit nicht mit der Dehnratenverfestigung gekoppelt, was dazu führt, dass die mit zunehmender Verformung abnehmende Dehnratenempfindlichkeit nicht berücksichtigt werden kann. Auch wird die geschwindigkeitsabhängige Veränderung der Verformungskennwerte, wie beispielsweise von Lüders- und Gleichmaßdehnung, nicht erfasst. Die sich daraus ergebende Formänderung der Fließkurve bei Veränderung der Dehnraten wird durch die in diesem Abschnitt gezeigten Ansätze somit nicht berücksichtigt.

Auch der Ansatz nach Langseth et al. [15] basiert auf dem zweiten Term des Modells nach Johnson & Cook („Johnson & Cook-Term“), welcher die Dehnratenverfestigung des Materials berücksichtigt. In ihrer Arbeit stellten sie ein aus zwei Funktionen bestehenden Modell vor, das die Fließkurve bei der Lüdersdehnung $A_{Lü}$ in einer Fallunterscheidung trennt:

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_{fo}} = \begin{cases} 1 + C_1 \cdot \log\left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) & \text{für } \epsilon_{pl} \leq A_{Lü} \\ F(\epsilon_{pl} - A_{Lü,0}) \cdot \left[1 + C_2 \cdot \log\left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right)\right] & \text{für } \epsilon_{pl} \geq A_{Lü} \end{cases}. \quad (2.14)$$

Vor Erreichen der Lüdersdehnung wird die Spannung auf Basis der quasistatischen Fließspannung σ_{fo} bestimmt und mithilfe eines Johnson & Cook-Terms linear-logarithmisch in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnraten $\dot{\epsilon}_{pl}$ skaliert. Für die Beschreibung der Fließkurve nach Überschreiten der Lüdersdehnung wird die quasistatische Fließkurve zunächst mithilfe eines Polynoms dritter Ordnung $F(\epsilon_{pl} - A_{Lü,0})$

approximiert. Diese wird im Anschluss wiederum mithilfe eines Johnson & Cook-Terms linear-logarithmisch dehnratenabhängig skaliert. Diese Vorgehensweise führt dazu, dass Lage und Länge des Fließplateaus innerhalb der Fließkurve berücksichtigt werden. Jedoch wird im weiteren Verlauf der Verformung die Fließkurve lediglich in Ordinate-Richtung verschoben und eine Änderung der Verfestigung über die Dehnraten nicht berücksichtigt. Da die wesentlichen Ansätze zur Berücksichtigung der Dehnratenverfestigung sowie der Fließkurvenmodellierung anhand der ursprünglichen Formulierung und der Modifikation nach Huh & Kang erläutert werden sollen, wird in dieser Arbeit nicht weiter auf diesen Ansatz eingegangen.

2.3.4 Cowper & Symonds

Das in der Arbeit von Cowper & Symonds [3] vorgestellte empirische Materialmodell beschreibt die dehnratenabhängige Spannungserhöhung mithilfe eines Skalierungsfaktors. Dieser ergibt sich aus der ursprünglichen Formulierung nach Gleichung (2.15) in Gleichung (2.16).

$$\dot{\varepsilon}_{pl} = D \cdot (\sigma_w - \sigma_0)^p, \quad (\sigma_w > \sigma_0) \quad (2.15)$$

$$\sigma_w(\dot{\varepsilon}_{pl}) = \sigma_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right]. \quad (2.16)$$

Die Formulierung beschreibt die Erhöhung der anfänglichen wahren Spannung σ_0 in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnrates $\dot{\varepsilon}_{pl}$ und mithilfe der zwei Modellparameter D und p . In der ursprünglichen Arbeit wird zur Berücksichtigung der Verformungsverfestigung eine lineare Beziehung vorgeschlagen:

$$\sigma_w(\varepsilon_{pl}) = \sigma_0 + \frac{E}{n} \cdot \varepsilon_{pl}, \quad (\sigma_w > \sigma_0). \quad (2.17)$$

Dieser Ansatz wird in der Literatur oftmals nicht beachtet. Vielmehr wird unter dem Ansatz nach Cowper & Symonds ein sogenanntes „overstress“-Modell verstanden, das eine vorhandene Referenz-Spannung oder eine Referenz-Fließkurve dehnratenabhängig skaliert. Vielfach wird hierfür ein bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelter Spannungswert bzw. eine Fließkurve verwendet. Auch in dieser Arbeit soll das

Modell nach Cowper & Symonds auf diese Weise verstanden und verwendet werden. Der Ansatz berücksichtigt lediglich die dehnratenabhängige Spannungszunahme, nicht jedoch eine Veränderung der Verformungskennwerte. Somit kann auch das Modell nach Cowper & Symonds eine geschwindigkeitsabhängige Formänderung der Fließkurve nicht abbilden, sondern verschiebt diese bei einer Erhöhung der Dehnrates lediglich zu höheren Spannungswerten.

2.3.5 Kühn

Das in der Arbeit von Kühn [10] vorgeschlagene Modell zur Beschreibung der unteren Streckgrenze in Abhängigkeit der Dehnrates und der Temperatur basiert auf der Theorie der thermischen Aktivierung von plastischen Umformvorgängen in Metallen. An dieser Stelle sollen lediglich die für diese Arbeit wesentlichen Inhalte in kurzer Form wiedergegeben werden. Für eine nähergehende Erläuterung der Theorie des thermisch aktivierten Fließens sowie der zugrunde liegenden metallphysikalischen Annahmen, insbesondere zu den Themen Versetzungen und Versetzungsbewegungen, sei unter anderem auf die Arbeiten Rösler et al. [47], Ehinger & Krüger [48], Krabiell [9] und Kühn [10] verwiesen.

Es wird davon ausgegangen, dass Versetzungen während der Bewegung durch das Gitter stets auf Hindernisse treffen. Dabei wird entsprechend ihres Wirkungsradius nach weitreichenden und kurzreichenden Hindernissen unterschieden. Die erstgenannte Gruppe gilt als athermisch, bzw. als nicht thermisch aktivierbar. Die letztgenannte Gruppe bildet den sogenannten thermisch beeinflussbaren Anteil. Dem Ansatz folgend lässt sich die Fließspannung in einen athermischen und einem thermischen Fließspannungsanteil zerlegen:

$$\sigma_f(G, \dot{\epsilon}_{pl}, T) = \sigma_{ath}(G) + \sigma_{th}(\dot{\epsilon}_{pl}, T, G) . \quad (2.18)$$

Der athermische Fließspannungsanteil σ_{ath} wird maßgeblich durch weitreichende Hindernisse geprägt und ausschließlich durch die Eigenschaften des Gefüges G und somit nicht durch die Temperatur oder Dehnrates beeinflusst. Zu den beeinflussenden Gefügeeigenschaften gehören beispielsweise der mittlere Korndurchmesser, Ausscheidungen und intermetallischen Phasen. Der thermische Fließspannungsanteil σ_{th} wird dagegen durch kurzreichende Hindernisse geprägt, die mittels thermischer

Gitterenergieschwankungen überwunden werden können. Maßgeblich beeinflussende Parameter sind neben der wahren plastischen Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl}$ die Temperatur T und die Eigenschaften des Gefüges G . Kurzreichende Hindernisse sind überwiegend sogenannte Peierls-Spannungen, die mittels des Peierls-Nabarro-Mechanismus überwunden werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Versetzungen sich wellenartig auf Gleitebenen fortbewegen und dabei Potentialhöhen und -tiefen überwinden (siehe Rösler et al. [47]).

Für den thermisch aktivierbaren Fließspannungsanteil σ_{th} liegen unterschiedliche Definitionen vor [49]. Eine allgemeine Form nach Macherauch & Vöhringer [50] ist in Gleichung (2.19) dargestellt.

$$\sigma_{th} = \sigma_0^* \cdot \left[1 - \left(\frac{\Delta G(\sigma)}{\Delta G_0} \right) \right]^m. \quad (2.19)$$

ΔG_0 ist die gesamte für die Überwindung eines Hindernisses erforderliche Aktivierungsenergie. σ_0^* ist der thermische Fließspannungsanteil bei einer Temperatur $T = 0 \text{ K}$, also ohne thermische Unterstützung. Die Aktivierungsenergie $\Delta G(\sigma)$ kann mithilfe des Arrhenius-Ansatzes wie folgt bestimmt werden [51]:

$$\Delta G(\sigma) = k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}_{pl}} \right). \quad (2.20)$$

Die Boltzmann-Konstante k ist eine Naturkonstante mit dem Wert $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$. $\dot{\epsilon}_0$ ist die sogenannte theoretische Grenzdehnrates, auch Bezugsdehnrates, die nach [21] für Stähle zwischen $10^6/\text{s}$ und $10^{12}/\text{s}$ liegt. Nach Einsetzen der Gleichungen (2.19) und (2.20) in (2.18) folgt für die untere Streckgrenze R_{eL} :

$$R_{eL} = R_{eL,RT} + \sigma_0^* \cdot \left[1 - \left(\frac{k \cdot T \cdot \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}_{pl}} \right)}{\Delta G_0} \right) \right]^m. \quad (2.21)$$

Zur dehnrates- und temperaturabhängigen Beschreibung der Veränderung der unteren Streckgrenze bei Raumtemperatur $R_{eL,RT}$ sind somit die Kenntnis von theoretischer Grenzdehnrates $\dot{\epsilon}_0$ und Aktivierungsenergie ΔG_0 notwendig. Als einziger Approximationsparameter ist der Exponent m_e zu bestimmen. So gesehen handelt es sich trotz des metallphysikalischen Hintergrunds um ein Modell, bei dem zur Bestimmung der

Modellparameter ein empirischer Ansatz verfolgt werden kann. In der Literatur wird in diesem Fall auch von einem semi-empirischen Modellansatz gesprochen.

In der Arbeit von Kühn [10] wurden in einer Literaturrecherche (vgl. [9], [6], [25], [52] und [22]) bestehende Werte für die materialabhängigen Modellparameter $\dot{\epsilon}_0$, ΔG_0 und m Werte zusammengetragen und untereinander verglichen. Es stellte sich heraus, dass bzgl. $\dot{\epsilon}_0$ und m zwischen normalfesten und hochfesten Baustählen unterschieden werden muss. Bezüglich des thermischen Anteils σ_0^* befand er, dass dieser einen wesentlich geringeren Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat, als der Exponent m . Folglich setzte er in seiner Formulierung, Gleichung (2.22), den thermischen Anteil auf einen Wert $\sigma_0^* = 960 \text{ N/mm}^2$ fest. Dagegen ist der Exponent m nach vorliegenden Versuchsdaten zu approximieren. Falls keine genaueren Messwerte für die materialabhängigen Modellparameter vorliegen, schlägt Kühn [10] vereinfachend die Verwendung der in Tabelle 1 gegebenen empfohlenen Modellparameter vor.

$$R_{eL}(\dot{\epsilon}_{pl}, T) = R_{eL,RT} + 960 \cdot \left(1 - 1,0767 \cdot 10^4 \cdot T \cdot \ln \left(\frac{10^8}{\dot{\epsilon}_{pl}} \right) \right)^m. \quad (2.22)$$

Mithilfe der in Tabelle 1 dargestellten empfohlenen Parameter lassen sich die von Kühn [10] untersuchten Versuchsdaten in guter Näherung beschreiben. Abbildung 2 zeigt dies beispielhaft anhand eines von Dahl & Belche [53] an einem Baustahl St 52-3 bei Raumtemperatur ermittelten Datensatzes. Die Abbildung zeigt die untere Streckgrenze R_{eL} über die wahre plastische Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl}$ sowie der nach Gleichung (2.22) berechnete Verlauf nach Kühn [10].

Tabelle 1: Empfohlene Werte für die Modellparameter nach Kühn [10].

Stahlsorte	σ_0^* [N/mm]	$\Delta\sigma_0$ [eV]	$\dot{\epsilon}_0$ [1/s]	m [-]
S235 bis S275	960	0,80	10^8	2,80
S355 bis S460	960	0,80	10^8	3,27
S690 bis S890	960	1,18	10^{10}	3,74

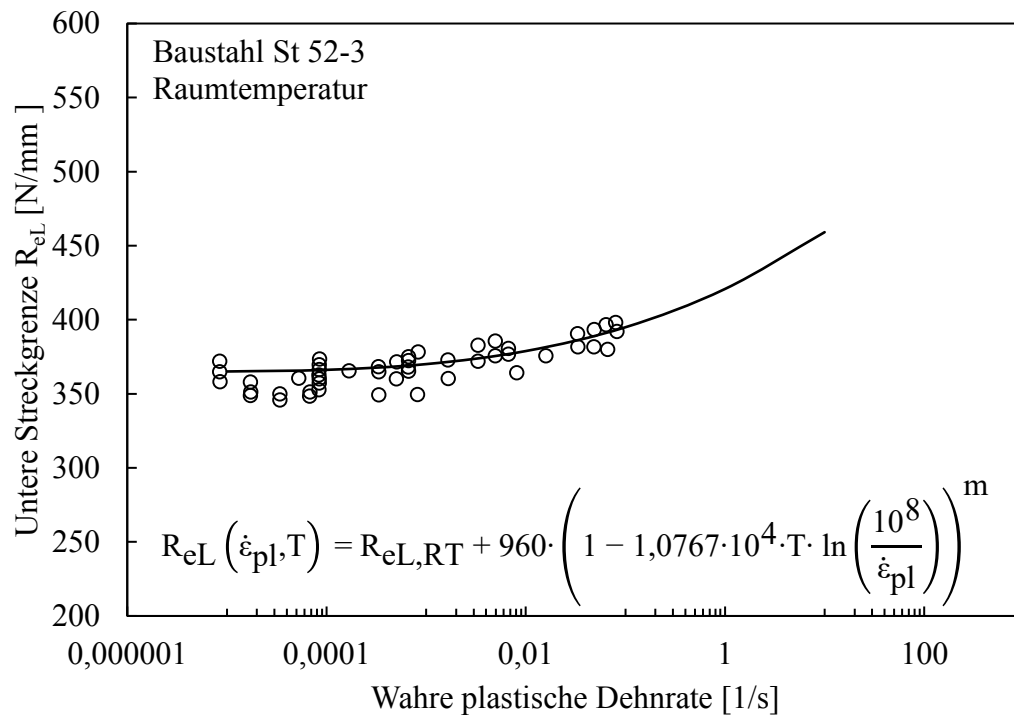


Abbildung 2: Entwicklung der unteren Streckgrenze eines Baustahls St 52-3 bei Raumtemperatur über die wahre plastische Dehnrate nach Kühn [10]. Versuchsdaten aus Dahl & Belche [53].

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Werkstoffauswahl

Die Werkstoffauswahl richtet sich an der Intention aus, eine möglichst repräsentative Auswahl bauüblicher Situationen abzudecken. Im Mittelpunkt steht dabei der überwiegend im Stahlbau eingesetzte normalisierte Baustahl S355J2+N nach DIN EN 10025-2 [13].

Zur Untersuchung der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch bestimmte Werkstoffkennwerte oder -eigenschaften wäre die isolierte Betrachtung einzelner Parameter wünschenswert. Die werkstofflichen Kennwerte und Eigenschaften der Versuchsmaterialien können jedoch nicht getrennt voneinander variiert werden, ohne jeweils wiederum andere gegebenenfalls beeinflussende Kennwerte und Eigenschaften zu verändern. Es wurde daher nach einem Maß gesucht, das möglichst viele Einflüsse berücksichtigt, bei denen eine beeinflussende Wirkung auf die Dehnratenempfindlichkeit vermutet wird. Die Kerbschlagarbeit wird auf der werkstofflichen Seite maßgeblich durch den Herstellungsprozess und die chemische Zusammensetzung beeinflusst. Diese wiederum beeinflussen maßgeblich die Art des sich ausbildenden Korngefüges sowie weiterer werkstofflicher Kennwerte und Eigenschaften wie Festigkeit und Zähigkeit. Der Zusammenhang zwischen diesen Werkstoffeigenschaften und -kennwerten und der Dehnratenempfindlichkeit wurde beispielsweise in Larour [12] untersucht.

Der allgemeine Zusammenhang von Prüftemperatur und Fließgrenze ist bereits umfangreich erforscht worden. In vorherigen Untersuchungen (vgl. z.B. Krabiell [9], Soliman [7]) ist festgestellt worden, dass eine Absenkung der Prüftemperatur einen ähnlichen Effekt auf die Streckgrenze ausübt, wie eine Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit. Da die Kerbschlagarbeit ebenfalls stark von der Prüftemperatur abhängig ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Dehnratenempfindlichkeit der Streckgrenze und die Kerbschlagarbeit ähnlich korreliert sind. Es wird daher vermutet, dass sich die Kerbschlagarbeit als Indikator für die Dehnratenempfindlichkeit eignet. Die Kerbschlagarbeit wird zudem im Kerbschlagbiegeversuch bereits unter dem Einfluss hoher Dehnraten ermittelt. Weiterhin kann von einer gewissen Vergleichbarkeit zwischen den Untersuchungen verschiedener

Arbeiten ausgegangen werden, da die Bestimmung der Kerbschlagarbeit einer normativen Regelung folgt (vgl. DIN EN ISO 148-1[12]).

Für den S355J2+N wurden daher gezielt drei verschiedene Chargen, Materialien B, C und D, ausgewählt, die die normativ mögliche Bandbreite der zulässigen Kerbschlagarbeit unter Berücksichtigung der normalen Verfügbarkeit abbilden.

Zur Abgrenzung der Dehnratenempfindlichkeit wird zusätzlich ein thermomechanisch gewalzter Feinkornbaustahl S355ML nach DIN EN 10025-4 [14], Material H, untersucht. Durch das thermomechanische Walzen wird im Vergleich zu den normalisierten Stahlsorten eine Kornfeinung erreicht sowie eine größere Kerbschlagzähigkeit. Die untersuchten Werkstoffe wurden im praxisrelevanten Anlieferungszustand belassen und lagen als Grobblech mit Blechdicken zwischen 12 mm und 16 mm vor. Eine Übersicht über die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Baustähle nach Abnahmeprüfzeugnis zeigt Tabelle 2.

Der Einfluss der Anisotropie des Grobblechs wurde anhand einer Charge, Material C, durch Probenentnahme längs und quer zur Walzrichtung des Grobblechs untersucht. Entsprechend der Orientierung zur Walzrichtung werden daher die Werkstoffbezeichnungen Material CL und CQ für die Untersuchung in Längs- und in Querrichtung eingeführt.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der untersuchten Baustähle nach Abnahmeprüfzeugnis.

Material	Werkstoff	Lieferbedingung	Blechdicke	R _{eH}	R _m	A	R _{eH} / R _m	KV
			[mm]	[N/mm]	[N/mm]	[%]	[-]	[J]
B	S355J2+N	DIN EN 10025-2	12	408	574	26,0	0,71	66
C	S355J2+N	DIN EN 10025-2	16	395	557	29,0	0,71	108
D	S355J2+N	DIN EN 10025-2	12	395	550	29,5	0,72	140
H	S355ML	DIN EN 10025-4	12	510	546	29,0	0,93	331 ¹⁾

1) Kerbschlagarbeit KV(-40°C)

Tabelle 3: Ergebnis der Schmelzanalyse gemäß DIN EN 10025-2 nach
Abnahmeprüfzeugnis.

Bez.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Nb	CEV
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	≤	≤	≤	≤	≤		≤						≤
	2	5,50	16	0,25	0,25		5,50						4,50
B	1,65	3,50	14,90	0,18	0,10	0,30	0,10	0,10	0,20	0,01	0,01	0,01	4,18
C	1,80	2,90	15,20	0,11	0,03	0,28	0,20	0,40	0,40	0,10	0,04	0,02	4,48
D	1,60	2,90	13,40	0,14	0,06	0,40	0,10	0,17	0,10	0,01	0,57	0,01	4,00
H	0,85	3,82	15,40	0,11	0,01	0,36	0,47	0,42	0,36	0,13	0,01	0,20	3,58

Ein Vergleich der chemischen Analysen der untersuchten Stähle (siehe Tabelle 3) zeigt, dass die drei Chargen S355J2+N sich hinsichtlich Kohlenstoffäquivalent, Kohlenstoff- und Niobgehalt deutlich von dem S355ML unterscheiden. Durch die thermomechanische Behandlung des S355ML wird eine Kornfeinung erreicht, die sich positiv auf Zähigkeit, Fließgrenze und Festigkeit des Stahls auswirkt und niedrigere Kohlenstoffgehalte ermöglicht. Niob dagegen gilt neben Titan und Vanadium als typisches Mikrolegierungselement, das bei einer thermomechanischen Behandlung eingesetzt wird. Alle drei Elemente führen zu einer Feinkorn- und Ausscheidungshärtung und erhöhen somit Streckgrenze, Festigkeit und Zähigkeit. Die Wirksamkeit von Niob, Titan und Vanadium ist bei einer thermomechanischen Behandlung wesentlich größer als bei einer reinen Wärmebehandlung wie beispielsweise das Normalisieren (vgl. Belche [6]).

Ein Vergleich der drei Chargen S355J2+N untereinander zeigt leichte Unterschiede bezüglich des Kohlenstoffäquivalents und den Konzentrationen von Mangan, Vanadium, Schwefel, Phosphor und Molybdän. Die Erschließung des Einflusses einzelner Legierungsbestandteile auf die Werkstoffeigenschaften ist nur schwer möglich, daher sollen an dieser Stelle lediglich die wesentlichen Unterschiede und Einflussmöglichkeiten aufgezeigt werden:

- Material B weist einen erhöhten Schwefel- und Phosphoranteil gegenüber den anderen normalisierten Baustählen im Versuchsprogramm auf. Beide Legierungsbestandteile haben einen senkenden Einfluss auf die Zähigkeit des Stahls.
- Material C weist einen erhöhten Molybdänanteil auf. Molybdän trägt zur Feinkornbildung bei und steigert die Festigkeit des Materials. Zudem weist Material C ein gegenüber Material B und D höheres Kohlenstoffäquivalent CEV auf.

- Material D weist einen gegenüber Material B und C deutlich größeren Vanadiumanteil auf. Vanadium hat einen positiven Einfluss auf die Feinkornbildung und steigert Festigkeit und Zähigkeit des Stahls.

3.2 Basischarakterisierung

3.2.1 Mikrostrukturelle Untersuchung

Um die Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen zu untersuchen, wurden im Rahmen der Basischarakterisierung mikrostrukturelle Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden Längs- und Querschliffe aus den Probekörpern erstellt (siehe Abbildung 3). Die Ergebnisse der Gefügeanalyse und der Korngrößenanalyse sind in den nachstehenden Abschnitten dargestellt.

3.2.1.1 Mikroschliffanalyse

Alle untersuchten Baustähle lagen im normalgeglühten Zustand mit einem ferritisch-perlitischen Mischgefüge vor. Ferrit bildet die Grundphase, in die einzelne Perlit-Inseln eingestreut sind. Es ist daher davon auszugehen, dass der mittlere Ferritkorndurchmesser die maßgebende Gefügekennggröße für die Festigkeit darstellt. Material H zeigt durch die thermomechanische Behandlung ein sehr feinkörniges Gefüge mit ähnlich geringem Perlit- und überwiegendem Ferrit-Anteil wie die Materialien B, C und D. Die ermittelten Ferrit- und Perlitanteile sind in Tabelle 4 dargestellt.

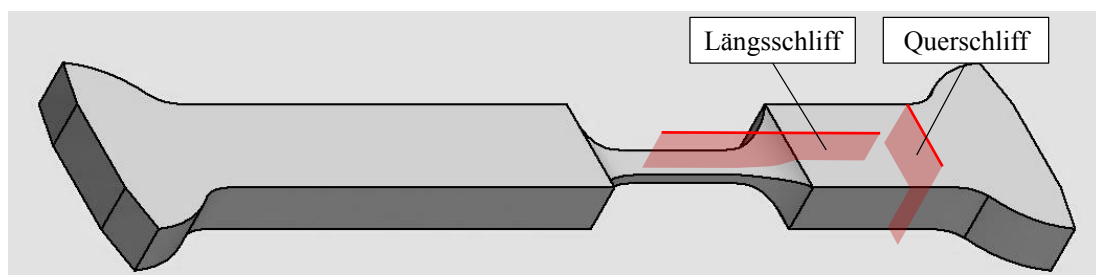


Abbildung 3: Entnahme der Längs- und Querschliffe aus den Probekörpern

Tabelle 4: Ferrit- und Perlit-Anteile der untersuchten Baustähle.

Material	B	CL	CQ	D	H
Ferritanteil [%]	77,4	71,2	72,7	79,4	76,6
Perlitanteil [%]	22,6	28,8	27,3	20,6	23,4

Insbesondere die Materialien B, C und D weisen eine längs und quer zur Walzrichtung verlaufende Zeilenstruktur vor, die im Mikroschliff sichtbar wird. Die untersuchten Baustähle lagen als Grobbleche vor. Diese werden als Walzerzeugnis unter einsinniger Verformung hergestellt. Die ausgeprägte Zeiligkeit (Walzzeiligkeit) entsteht durch Bereiche unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und anderer Walzeinschlüsse, die im Umformprozess gestreckt werden, was im Schliff als Zeilenstruktur sichtbar wird.

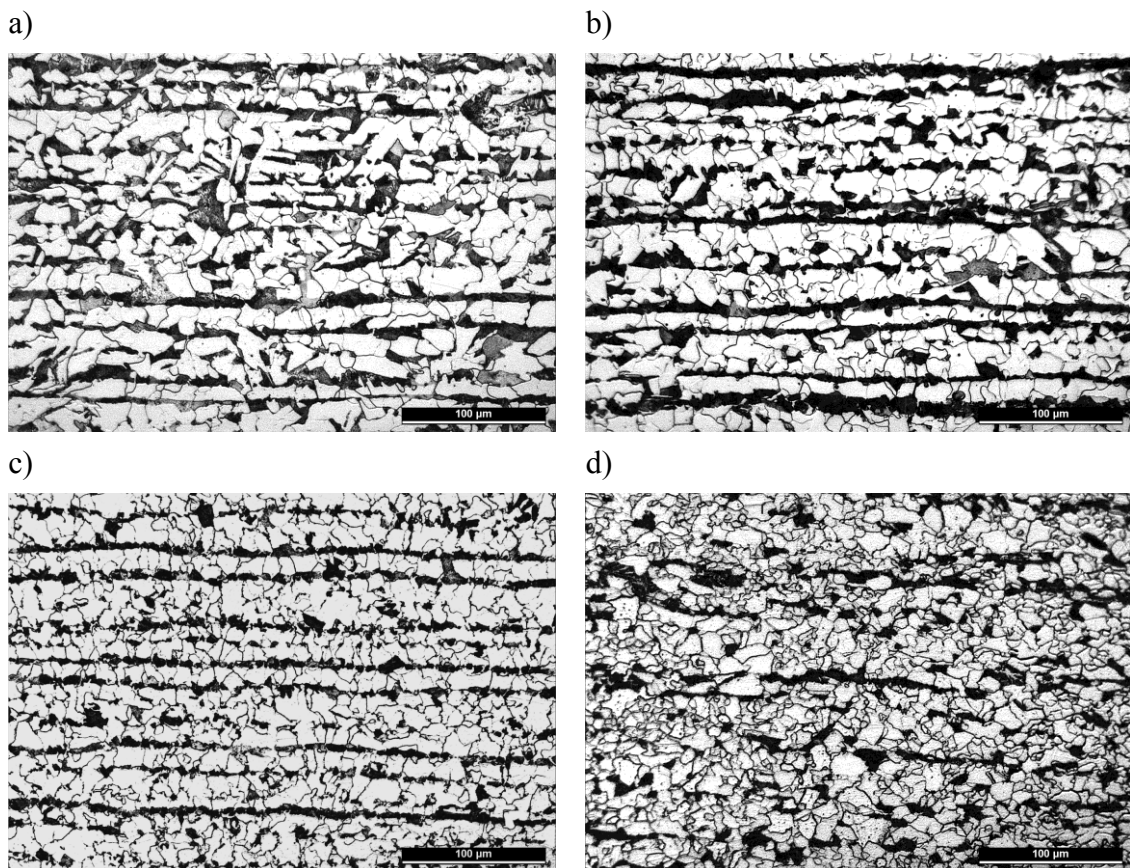


Abbildung 4: Längsschliffe der Proben bei 200-facher Vergrößerung: a) Material B, b) Material C, c) Material D, d) Material H

3.2.1.2 Korngrößenbestimmung

Die Korngrößenbestimmung erfolgte anhand der aus den Proben gewonnenen Mikroschliffe. Die Auswertung wurde halbautomatisch im Linien-/ Kreisschnittverfahren in Anlehnung an DIN EN ISO 643 [54] und ASTM E-112 [55] durchgeführt. Hierzu wurden zunächst Binärbilder aus den Mikroschliffbildern erstellt, die im Anschluss mithilfe des Programms Matlab / Simulink ausgewertet wurden. Zur Kontrolle wurde zusätzlich eine manuelle Auswertung mittels des Flächenauszahlverfahrens durchgeführt. Die Unterschiede bei den ermittelten ASTM Korngrößenkennzahlen liegen unter 3 %. Die in Tabelle 5 dargestellten Korngrößenkennzahlen und -durchmesser stellen Mittelwerte aus mindestens drei Messungen dar. Demnach sind die untersuchten Baustähle Material B und C in die Gruppe der Feinkornstähle (ASTM 6 bis 9 nach [55]), die Baustähle Material D und H in die Gruppe der Feinstkornstähle (ASTM 10 bis 15 nach [55]) einzuordnen. Es ist davon auszugehen, dass die Kristallite in Quer- und Längsrichtung ähnliche Dimensionen aufweisen, da die Unterschiede der jeweiligen mittleren Korndurchmesser unter 5 % liegen.

3.2.2 Kerbschlagbiegeversuche

Für die Versuchswerkstoffe wurden Kerbschlagbiegeversuche nach Charpy gemäß DIN EN ISO 148-1 [56] bei -20°C durchgeführt. Für die Materialien B, C und D wurden Spitzkerb-Längsproben als Normal-Proben untersucht. Für Material C wurden zusätzlich Kerbschlagarbeiten quer zur Walzrichtung ermittelt. Für Material H wurden die Kerbschlagarbeiten an Spitzkerb-Längsproben als Untermaß-Proben mit 7,5 mm Nennmaß ermittelt und für die Vergleichbarkeit umgerechnet. Die ermittelten Minimal -, Maximal- und Medianwerte der Kerbschlagarbeiten sind in Abbildung 5 dargestellt.

Tabelle 5: Ermittelte ASTM Korngrößenkennzahlen und mittlere Korndurchmesser

Material	B		C		D		H	
Ausrichtung zur Walzrichtung	längs	quer	längs	quer	längs	quer	längs	quer
ASTM Korngrößenkennzahl G [-]	9,4	9,5	9,9	9,8	10,5	10,8	10,9	11,2
Mittlerer Korndurchmesser d [μm]	13,7	13,1	11,7	11,7	9,2	8,4	8,0	7,4

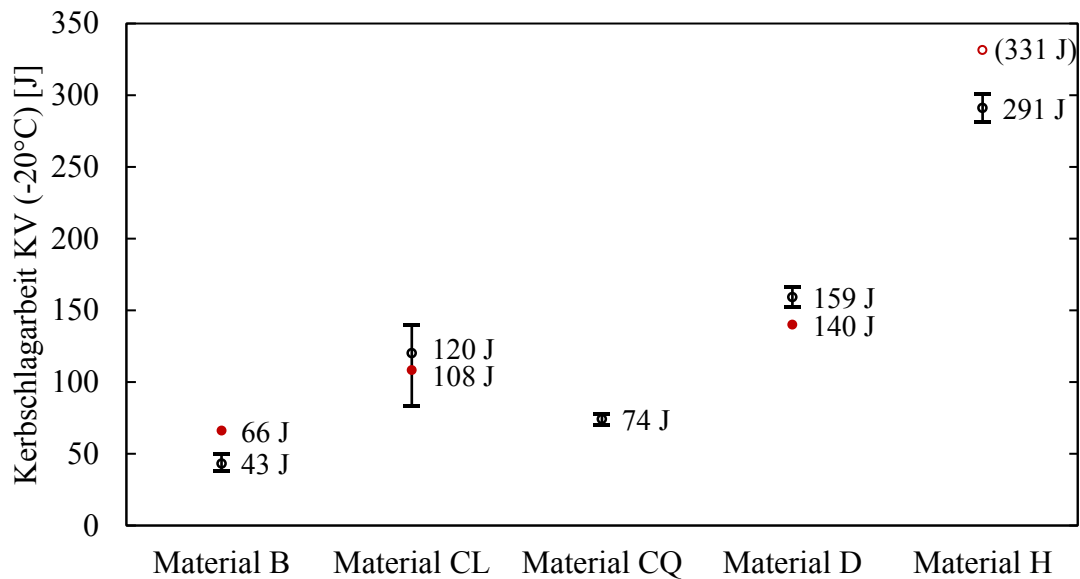


Abbildung 5: Ermittelte Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Kerbschlagarbeiten nach DIN EN ISO 148-1 [56]. Arbeitswerte nach Abnahmeprüfzeugnis in rot markiert.

Im Vergleich mit den anderen untersuchten Stählen zeigt Material CL ein sehr großes Streuintervall der ermittelten Werte. Dies deutet darauf hin, dass die Prüftemperatur nahe der Übergangstemperatur liegt und die Arbeitswerte den Steilabfall, also das Gebiet zwischen Hoch- und Tieflage, widerspiegeln. Die für Material CQ ermittelten Kerbschlagarbeiten liegen im Mittel mit 74 J deutlich unter dem entsprechenden Wert für Material CL. Dies liegt daran, dass das Material C mit einem ferritisch-perlitischen Gefüge mit ausgeprägter Zeiligkeit vorlag. Bei Beanspruchung in Querrichtung verläuft die Rissbildung somit in die Zeiligkeit.

Die Kerbschlagbiegeversuche zeigen, dass mit einer Übererfüllung des normativen Solls zu rechnen ist. Die ermittelten Kerbschlagarbeiten liegen teilweise deutlich über den in DIN EN 10025-2 [13] und DIN EN 10025-4 [14] vorgegebenen Grenzwerten. Die in den jeweiligen Abnahmeprüfzeugnissen angegebenen Mittelwerte der Kerbschlagarbeiten sind in Abbildung 5 rot dargestellt. Für Material H lagen lediglich Arbeitswerte KV(-40°C) vor.

Der Vergleich mit den in eigenen Versuchen ermittelten Arbeitswerten zeigt teils niedrigere (Material B und H) und teils höhere (Material CL und D) Werte. So sollte Material H laut Abnahmeprüfzeugnis eine mittlere Kerbschlagarbeit KV(-40°C) von 331 J

vorweisen. Im Rahmen der durchgeführten Kerbschlagbiegeversuche bei einer Temperatur von -20°C konnte dieser Arbeitswert im Mittel jedoch nicht erreicht werden. Dies kann auf die versuchsbegleitenden Unsicherheiten zurückgeführt werden, die im Zusammenhang mit dem verwendeten Pendelschlagwerk, bzw. der Versuchsdurchführung, mit der Homogenität des Werkstoffs sowie der Prüftemperatur stehen.

3.2.3 Zugversuche

Der quasistatische Zugversuch ist das wichtigste Prüfverfahren zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs. Im Rahmen der Basischarakterisierung wurden die untersuchten Baustähle in quasistatischen Zugversuchen nach DIN EN 6892-1 [30] geprüft. Die ermittelten Daten stellen als quasistatische Referenz die Grundlage dar für den Vergleich mit der dynamischen Werkstoffcharakterisierung. Die Zugversuche wurden dehnungsgeregelt in einer hydraulischen Universalprüfmaschine (Fabrikat Schenck) durchgeführt. Nach [30] kann die Dehngeschwindigkeit in Abhängigkeit der zu ermittelnden Kennwerten gewählt und variiert werden. Da eine konstante Dehngeschwindigkeit über die gesamte Versuchsdauer wünschenswert ist, wurde Bereich 2 gewählt. Dieser ist für alle zu ermittelten Kennwerte zulässig und gibt eine konstante Dehngeschwindigkeit von $\dot{\epsilon}_{\text{nom}} = 0,00025/\text{s}$ vor.

Die Verformungsmessung erfolgte berührungslos durch ein Laserextensometer (Fabrikat Fiedler). Die Kraftmessung erfolgte zum einen durch einen Kraftmesssensor (KMS). Zum anderen durch auf dem Probekörper applizierte Dehnungsmessstreifen (DMS). Die quasistatischen Zugversuche konnten somit verwendet werden, um die nach DIN EN 26203-1 [20] geforderte Kalibrierung der Kraftmessung durch DMS für die Hochgeschwindigkeitszugversuche (siehe Abschnitt 3.3.6) durchzuführen.

Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde für die quasistatischen Zugversuche dieselbe Probekörpergeometrie gewählt wie für die im Rahmen der dynamischen Charakterisierung durchgeführten Zugversuche. Auf die Besonderheiten der Geometrie wird in Abschnitt 3.3.3 eingegangen.

3.3 Dynamische Charakterisierung

Die dynamische Werkstoffcharakterisierung im Hochgeschwindigkeitszugversuch war bis zur Einführung der Normen DIN EN ISO 26203-1 [57] und -2 [20] lediglich durch verschiedene Prüfrichtlinien (SEP 1230 [17], FAT 211 [18], ESIS P7-00 [19]) geregelt. Die Prüfrichtlinien sind ähnlich aufgebaut und geben in wesentlichen Bereichen ähnliche Angaben vor, beispielsweise hinsichtlich der Ermittlung der unteren Streckgrenze, Angabe der Grenzfrequenzen von Kraft- und Verformungsmessung und zur Bestimmung der Dehnrates. Somit wird auf die wesentlichen Aspekte des Hochgeschwindigkeitszugversuchs, die Konzipierung und Durchführung des Versuchs sowie die Verarbeitung und Auswertung der Versuchsdaten, eingegangen. Die Einführung der Prüfrichtlinien und Normen zur Durchführung von dynamischen Zugversuchen in jüngerer Zeit vereinfacht die Vergleichbarkeit der Arbeiten zu diesem Thema. Weiterhin können die Prüfeempfehlungen als Ansatz gesehen werden, die dynamische Werkstoffcharakterisierung im Hochgeschwindigkeitszugversuch zu standardisieren und in den wesentlichen Bereichen zu vereinheitlichen. Die DIN EN ISO 26203-2 [20] behandelt den für diese Arbeit relevanten Hochgeschwindigkeitszugversuch in servohydraulischen Prüfsystemen und ging im Wesentlichen aus der Prüfrichtlinie SEP 1230 [17] hervor.

Im Rahmen der dynamischen Charakterisierung wurden die in Abschnitt 3.1 dargestellten Versuchswerkstoffe hinsichtlich des geschwindigkeitsabhängigen Werkstoffverhaltens untersucht. Hierzu wurden gemäß DIN EN 6892-1 [30] und DIN EN ISO 26203-2 [20] insgesamt 86 Zugversuche bei Raumtemperatur unter Variation der Beanspruchungsgeschwindigkeit durchgeführt.

Tabelle 6 zeigt eine Übersicht über die Anzahl der durchgeführten Versuche und der jeweiligen nominellen Dehnrates.

Tabelle 6: Versuchsmatrix.

			Anzahl durchgeführter Versuche						
			Nominelle Dehnrage [1/s]						
Material	Werkstoff	Lieferbedingung	0,00025	0,01	1	20	100	200	400
B	S355J2+N	DIN EN 10025-2	1	1	3	3	6	3	0
CL	S355J2+N	DIN EN 10025-2	2	3	3	4	3	3	1
CQ	S355J2+N	DIN EN 10025-2	2	4	3	3	0	4	0
D	S355J2+N	DIN EN 10025-2	2	3	3	3	3	0	3
H	S355ML	DIN EN 10025-4	1	1	3	5	4	3	0

3.3.1 Prüfsystem

Die servohydraulische Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine vom Typ VHS 65/25 der Firma Instron ermöglicht eine maximale Belastungsgeschwindigkeit von $v_0 = 25 \text{ m/s}$ im unregelmäßigen, über kalibrierte Ventilöffnung gesteuerten, Betrieb sowie Abzugsgeschwindigkeiten bis ca. $v_0 = 1 \text{ m/s}$ im geregelten Betrieb.

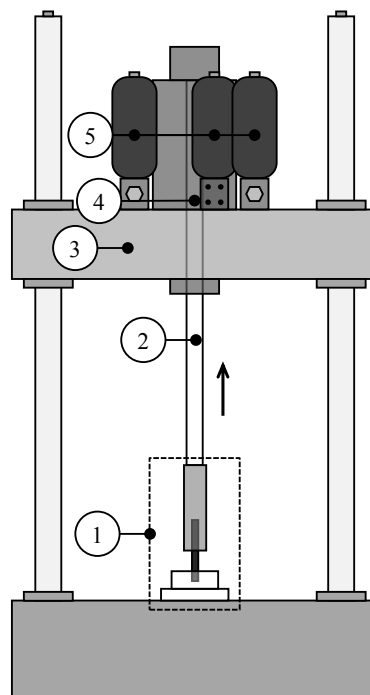


Abbildung 6: Servohydraulisches Hochgeschwindigkeitsprüfsystem VHS 65/25 der Firma Instron. 1: Versuchsaufbau (siehe Abschnitt 3.3.2). 2: Hydraulikzylinder. 3: Höhenverstellbares Querhaupt. 4: Induktiver Wegaufnehmer. 5: Druckspeicher.

Die Prüfmaschine ist schematisch in Abbildung 6 dargestellt. Mit der Prüfmaschine sind Hochgeschwindigkeitszug- und -druckversuche mit einer maximalen dynamischen Prüfkraft von $F = \pm 50 \text{ kN}$ möglich. Statisch kann eine Prüfkraft von $F = \pm 65 \text{ kN}$ erreicht werden. Die messtechnische Grundausstattung des Prüfsystems besteht aus einem piezoelektrischen Kraftmesssensor (KMS) (Fabrikat Kistler) und aus einem induktiven Wegaufnehmer.

3.3.2 Versuchsaufbau

Der verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 dargestellt. Durch die Verwendung eines Vorlaufadapters ist das freie Beschleunigen des Hydraulikzylinders auf die Soll-Geschwindigkeit möglich. Erst nachdem diese erreicht wurde, wird die Probe am oberen Probenende erfasst und beansprucht. Die Kraft wird formschlüssig über einen ausgerundeten Schulterkopf durch den Vorlaufadapter in die Probe eingeleitet. An der unteren Probeneinspannung wird die Probe durch einen ebenfalls gerundeten Schulterkopf formschlüssig gelagert. Diese Lagerung ermöglicht vor Versuchsbeginn die Ausrichtung der Probe in der Messebene, bevor die Probe mittels Verschlussklappe durch Klemmung fixiert wird. Die Erfassung der Biegung aus der Messebene geschieht durch eine beidseitige Messung der Verformungen auf der Probe. Der Vorlaufadapter wurde in umfangreichen Voruntersuchungen hinsichtlich des Gewichts optimiert, um die beschleunigten Massen zu reduzieren. Die Steifigkeit wurde durch aufgeschraubte Versteifungsplatten, die den Vorlaufadapter allseitig schließen modifiziert. Abbildung 7 zeigt den Vorlaufadapter ohne die Versteifungsplatten.

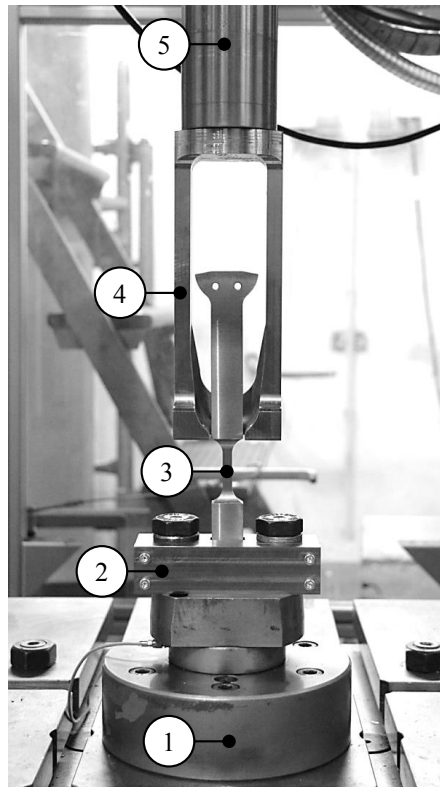


Abbildung 7: Versuchsaufbau. 1: Piezoelektrischer KMS. 2: Untere Halterung. 3: Probe. 4: Vorlaufadapter. 5: Hydraulikzylinder.

3.3.3 Probengeometrie

Die Probengeometrie wurde unter Berücksichtigung der geltenden Norm DIN EN ISO 26203-2 [20] sowie der Prüfeempfehlungen FAT 211 [18] und ESIS P7-00 [19] bestimmt. Eine schematische Darstellung der Probe zeigt Abbildung 8. Die parallele Länge im Messbereich wurde zu $L_C = 22 \text{ mm}$ festgelegt. In Verbindung mit dem verwendeten Prüfsystem ermöglicht dies eine theoretische nominelle Dehnrates von maximal $\dot{\epsilon}_{\text{nom}} = 1136/\text{s}$. Um die Vergleichbarkeit mit bestehenden Arbeiten hinsichtlich der Bruchdehnung zu gewährleisten, wurde die Ausgangsmesslänge zu $L_0 = 19,6 \text{ mm}$ und das Messlängenverhältnis eines Proportionalstabs ($L_0/\sqrt{S_0} = 5,65$) gewählt. Der sich während des Versuchs rein elastisch verformende Dynamometerbereich der Probe wird beidseitig mit Dehnungsmessstreifen (DMS) bestückt und dient zur lokalen Kraftmessung.

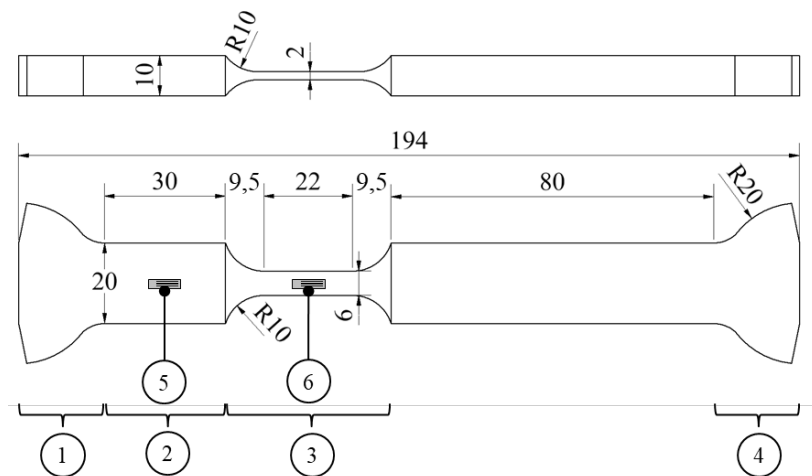


Abbildung 8: Probengeometrie. Maße in mm. 1: Unterer Schulterkopfbereich. 2: Dynamometerbereich. 3: Messbereich. 4: Oberer Schulterkopfbereich. 5: Lokale DMS-Kraftmessung (beidseitig). 6: Lokale DMS-Verformungsmessung (einseitig).

Eine Besonderheit der Probengeometrie stellen die ausgerundeten Schulterköpfe dar. Die Kontaktflächen der unteren Halterung (siehe Abbildung 7) und des Vorlaufadapters zur Probe sind gleichartig ausgeformt und bilden somit die Gegenstücke zu den Schulterköpfen. Dies ermöglicht eine dreh- und klemmfixierbare Lagerung der Probe in der unteren Halterung sowie das Ausrichten der Probe mithilfe des Vorlaufadapters in der Messebene. Insbesondere das Ausrichten des Probenkörpers im Laststrang ist bei Verwendung anderer üblicher Vorlauf- und Haltesysteme, wie beispielsweise das in der Arbeit von König [58] verwendete System „Schneller Beißer“ der Firma Instron, nicht möglich.

3.3.4 Kraftmessung

Entsprechend der gängigen Praxis und den Prüfeempfehlungen nach [17–20] folgend wurde eine lokale Kraftmessung durch im Dynamometerbereich angeordnete DMS verwendet (siehe Abbildung 8). Da sich dieser Teil der Probe ausschließlich elastisch verformt, ist es möglich, den zeitlichen Verlauf der Prüfkraft über die Dauer des Versuchs bis zum Bruch der Probe zu ermitteln. Um einen etwaigen verbleibenden Biegeeinfluss identifizieren zu können, werden beidseitig DMS in Viertelbrücken-Schaltung angebracht. Die Kalibrierung der lokalen Kraftmessung wurde mithilfe der in Abschnitt 3.2.3 dargestellten quasistatischen Zugversuche durchgeführt. Für einen qualitativen Vergleich wurde das

Signal des prüfmaschineninternen, piezoelektrischen KMS zusätzlich zu der lokalen Kraftmessung auf der Probe aufgezeichnet.

3.3.5 Verformungsmessung

Die lokale Verformungsmessung wurde durch im Messbereich der Probe angeordnete hochdehnfähige DMS realisiert. Die verwendeten DMS gehören zum Typ der linearen Metallfolie-DMS (Modell Y-FLA der Firma TML Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.). Für die verwendeten DMS wurde ein spezieller Trägerwerkstoff verwendet, der eine größere Dehnbarkeit im Vergleich zum standardmäßig verwendeten Typ (Modell FLA) besitzt. Zudem wurden die DMS mittels eines geeigneten Klebstoffs, ein Cyanoacrylatklebstoff (Typ CN-Y), appliziert, der eine ähnliche Hochdehnungseigenschaft besitzt. Die DMS haben laut Herstellerspezifikation eine maximale Dehnbarkeit von 15-20 %, was nach Abschluss der Versuchsreihe bestätigt werden kann. Für einen qualitativen Vergleich wurde das Signal des prüfmaschineninternen induktiven Wegaufnehmers zusätzlich aufgezeichnet. Dies entspricht einer globalen Verformungsmessung und lässt lediglich eine qualitative Aussage über das Materialverhalten zu. Einflüsse aus Maschinensteifigkeit, Steifigkeit des Spannzeugs, der Probe und des piezoelektrischen KMS verfälschen die Verformungsmessung durch zusätzliche Verformungsanteile, die außerhalb des Messbereichs auftreten.

Durch das Messprinzip der DMS werden lediglich Verformungen im unmittelbaren Bereich der Trägerfolie bzw. des Messgitters erfasst. Dies entspricht einer punktuellen Messung, welche sich von der Erfassung eines integralen Verformungsmaßes unterscheidet. Die Unterschiede werden deutlich, wenn der zeitliche Verlauf der Dehnung betrachtet wird (siehe Abbildung 9). Oben links sind schematisch zu vier verschiedenen Zeitpunkten eins bis vier die Messbereiche der Probe dargestellt mit den Anteilen elastischer (weiß) und plastischer (hellgrau) Verformung sowie mit der Lage der Lüdersfront und des DMS. Es wird deutlich, dass ab Fließbeginn (Zeitpunkt 1) die Lüdersfront vom Querschnittsübergang ausgehend durch den Messbereich wandert und sich der Anteil plastischer Verformung vergrößert, der elastische Anteil sich entsprechend verringert. Der Zeitraum, in dem die Lüdersfront den Erfassungsbereich des DMS (dunkelgrau) erreicht und wieder verlässt, wird durch den Bereich zwischen Zeitpunkt 2 und 3 beschrieben. Zeitpunkt 4 kennzeichnet das Ende des Fließplateaus. Die zu diesem Zeitpunkt erreichte plastische Dehnung entspricht der Lüdersdehnung $A_{Lü}$.

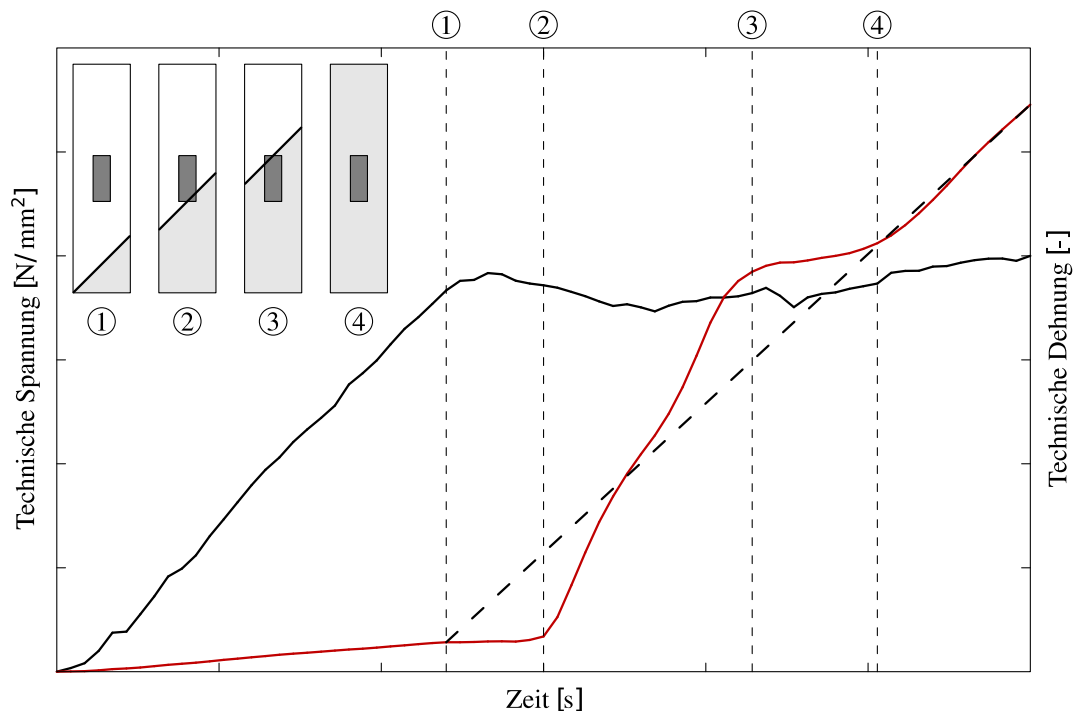


Abbildung 9: Zeitliche Verläufe von technischer Spannung und technischer Dehnung bei einer nominellen Dehnrates von 1/s

Der zeitliche Verlauf der Dehnung ist in Abbildung 9 rot dargestellt. Die Kurve zeigt in den Bereichen zwischen den Zeitpunkten 1 und 2 sowie 3 und 4 einen nahezu horizontalen Verlauf. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der Bereich in dem die maßgebliche Verformung stattfindet, außerhalb des Erfassungsbereiches des DMS liegt. Der Bereich zwischen den Zeitpunkten 2 und 3 dagegen weist eine verhältnismäßig große Steigung auf. Die Lüdersfront wandert unter dem DMS hindurch, sodass sich der Bereich, in dem die maßgebliche plastische Verformung stattfindet, unmittelbar im Erfassungsbereich des DMS befindet.

Ein Vorteil dieses Messprinzips ist die Möglichkeit, Beginn und Ende des Fließplateaus sowie die Lüdersdehnung aus den Versuchsdaten bestimmen zu können. Die Verbindung zwischen Beginn und Ende des Fließplateaus im zeitlichen Verlauf der Dehnung (diagonale gestrichelte Linie) stellt den Verlauf der integralen Verformung dar. Diese setzt sich im Verfestigungsbereich bis zum Erreichen der Gleichmaßdehnung bei nahezu gleichbleibender Steigung fort.

3.3.6 Messtechnik und Signalaufbereitung

Zur Messwerterfassung wurde ein Transienten-Recorder vom Typ LTT24 (Fabrikat Labortechnik Tasler) verwendet. Die Qualität der Messwerterfassung hängt vor allem von der Abtastfrequenz wie auch von der Auflösung des A/D-Wandlers ab. Für eine ausreichend genaue Darstellung des Spannungs-Dehnungsverlaufs auch bei sehr hohen Dehnraten und entsprechend kurzen Versuchszeiten ist eine Abtastfrequenz von etwa 4 MHz erforderlich. Bei einer Dehnrate von beispielsweise $\dot{\varepsilon} = 800/\text{s}$ werden somit 10 Messpunkte im elastischen Bereich bis $\varepsilon = 0,002$ erfasst. Die gemäß [18] vorgegebene Mindestanzahl von 1000 Messwerten pro Versuch wird bei dieser Dehnrate bei einer Dehnung von $\varepsilon = 0,2$ erreicht. Das verwendete Messdatenerfassungsgerät liefert eine Bittiefe von 24 bit, welche auch bei der maximalen Abtastfrequenz von 4 MHz erreicht wird, und erfüllt somit die in den Prüfeempfehlungen angegebenen Anforderungen an das Messsystem.

Die im Hochgeschwindigkeitszugversuch ermittelten Messsignale weisen üblicherweise ein hochfrequentes Rauschen auf. Dies lässt sich auf die entsprechend der Versuchsdauer hohe Abtastfrequenz, bzw. auf die Bandbreite der verwendeten Messkette zurückführen. Das Rauschen tritt dagegen bei quasistatischen Zugversuchen nicht auf, da die hochfrequenten Signalanteile aufgrund der deutlich geringeren Bandbreite der üblicherweise verwendeten Messketten herausgefiltert werden.

Zur Rauschunterdrückung wurden in dieser Arbeit die Kraft- und Verformungssignale separat gefiltert. Hierzu wurde ein zweistufiger Tiefpassfilter mit Butterworth-Charakteristik verwendet. Die Grenzfrequenzen wurden in Abhängigkeit der Qualität des Ursprungssignals und der Messfrequenz des jeweiligen Versuchs festgelegt. Dies war insbesondere für die Auswertung der lokalen Kraftmessung notwendig, da hier das Nutzsignal, also die gemessenen Brückenverstimmungen der rein elastischen Verformungen im Dynamometerbereich der Probe, im Verhältnis zum Grundrauschen sehr klein ist. Im Allgemeinen kann jedoch der Befund nach Böhme et al. [59] bestätigt werden, wonach der Prozess der Signalaufbereitung und der Auswertung wenig Einfluss auf die im Versuch ermittelten Kennwerte hat. In den Prüfrichtlinien (siehe beispielsweise [60]) werden als übliche Bearbeitungsschritte neben einer Tiefpassfilterung des Messsignals auch eine Signal-Glättung und Datenreduktion empfohlen. Die beiden letztgenannten Bearbeitungsschritte waren bei den in dieser Arbeit ausgewerteten Versuchen jedoch nicht notwendig.

3.3.7 Ermittlung der Fließkurven

Im Rahmen der Basis- und der dynamischen Charakterisierung wurden monotone einachsige Zugversuche unter Variation der Beanspruchungsgeschwindigkeit durchgeführt. Zur Beurteilung des Verformungsverhaltens eines Werkstoffs hat sich in der Praxis die Darstellung experimenteller Daten in Form von Fließkurven, also die wahre Spannung aufgetragen über die wahre plastische Dehnung, bewährt.

Die aus dem Zugversuch resultierenden Verläufe von Prüfkraft F und Prüfweg ΔL können durch das Beziehen auf den anfänglichen Messquerschnitt A_0 , bzw. die ursprüngliche parallele Länge L_c , in technische Spannungen und Dehnungen umgerechnet werden:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_t = \frac{dL}{L_c} = \frac{L - L_c}{L_c} \quad (3.2)$$

Die technischen Spannungen und Dehnungen werden somit jeweils durch Division durch konstante Werte berechnet. Mit zunehmender Längsverformung geht eine Querverformung der Probe einher, die zu einer Verringerung des Messquerschnitts führt. Die wahre Spannung σ_w , die sich auf die tatsächliche Querschnittsfläche A bezieht, ist somit höher, als die technische, wobei die Differenz mit zunehmender Verformung größer wird. Bis zum Erreichen der Gleichmaßdehnung kann dagegen das Volumen V als konstant angesehen werden:

$$V = A_0 \cdot L_c = A \cdot L \quad (3.3)$$

Dies kann wie folgt umformuliert werden:

$$\frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_c} = \frac{\Delta L + L_c}{L_c} = 1 + \frac{\Delta L}{L_c} = 1 + \varepsilon_t \quad (3.4)$$

Bis Erreichen der Gleichmaßdehnung kann somit unter Annahme der Volumenkonstanz die wahre Spannung nach Gleichung (3.5) berechnet werden.

$$\sigma_w = \frac{F}{A} = \frac{F}{A} \cdot \frac{A_0}{A_0} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A} = \sigma_t \cdot (1 + \varepsilon_t) \quad (3.5)$$

Bis zu diesem Zeitpunkt herrscht innerhalb der Messlänge der Probe eine weitgehend homogene Verformung vor, die nach [6] lediglich durch geometrische Formabweichungen der Probe oder werkstoffliche Inhomogenität gestört wird. Mit der Gleichmaßdehnung wird die maximale Prüfkraft und somit das Maximum der technischen Spannung σ_t erreicht. Im Anschluss setzt die lokale Einschnürung der Probe als Folge plastischer Instabilität ein. Durch die starke geometrische Veränderung der Probe innerhalb der Messlänge ist die Ermittlung des weiteren Verlaufes der Fließkurve nur mithilfe zusätzlicher Messtechnik möglich, die den tatsächlichen Messquerschnitt A bis zum Bruch der Probe erfassen kann.

Analog zur wahren Spannung σ_w lässt sich die wahre Dehnung ε_w unter Voraussetzung von homogener Verformung und Volumenkonstanz bis zur Gleichmaßdehnung durch Integration aller Dehnungssinkremente $d\varepsilon$ nach (3.6) bestimmen.

$$\varepsilon_w = \int \Delta\varepsilon = \int \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_C}\right) = \ln\left(\frac{dL + L_C}{L_C}\right) = \ln\left(1 + \frac{dL}{L_C}\right) = \ln(1 + \varepsilon_t) \quad (3.6)$$

Die wahre plastische Dehnung $\varepsilon_{w,pl}$ erhält man nach Abzug des elastischen Dehnungsanteils $\varepsilon_{w,el}$:

$$\varepsilon_{w,pl} = \varepsilon_w - \varepsilon_{w,el} = \ln(1 + \varepsilon_t) - \frac{\sigma_w}{E} \quad (3.7)$$

3.3.8 Ermittlung der Dehnraten

Neben der nominellen Dehnrate wurde in dieser Arbeit die plastische Dehnrate bestimmt. Entgegen den Angaben in Abschnitt 2.1.1 wurde die plastische Dehnrate jedoch anhand der wahren plastischen Dehnungen ermittelt und soll in dieser Arbeit daher als wahre plastische Dehnrate $\dot{\varepsilon}_{pl}$ bezeichnet werden. Da die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Werkstoffmodelle die Entwicklung einer wahren Spannung in Bezug auf eine wahre plastische Dehnung unter Berücksichtigung einer wahren plastischen Dehnrate beschreiben, werden in dieser Arbeit die Dehnraten in Anlehnung an die oben genannten Prüfeempfehlungen und Normen jedoch auf der Basis von wahren plastischen Dehnungen

bestimmt. Unter dem Begriff der Dehnratesoll in dieser Arbeit stets die wahre plastische Dehnrates zu verstehen sein.

Grundlage für die Berechnung der wahren plastischen Dehnrates sind die lokal gemessenen Verformungen durch die DMS im Messbereich der Probe. Dabei hat sich herausgestellt, dass der Bereich des Fließplateaus nicht zur Bestimmung der wahren plastischen Dehnrates herangezogen werden sollten. Durch das stark lokalisierte Messprinzip der DMS werden das Ein- und Auslaufen der Dehnungswelle sowie die damit verbundenen Effekte mit erfasst. Im zeitlichen Verlauf der Dehnungen stellt sich dies durch Bereiche zu kleiner und zu großer Steigungen, bzw. durch zu niedrige und zu hohe Dehnrates dar (siehe Abbildung 9). Aus diesem Grund wurde als untere Grenze für die Bestimmung der wahren plastischen Dehnrates eine wahre plastische Dehnung von 3 % festgelegt. Trotz der Verwendung hochdehnfähiger DMS war eine zuverlässige Auswertung der DMS-Messung bis zum Erreichen der Gleichmaßdehnung nicht für alle Versuche gewährleistet. Um eine Vergleichbarkeit für alle ermittelten wahren plastischen Dehnrates beizubehalten, wurde eine obere Grenze mit einer wahren plastischen Dehnung von 10 % festgelegt. Die Berechnung der wahren plastischen Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl}$ erfolgte somit nach Gleichung (3.8). Auf die Besonderheiten der Dehnungsmessung wird in Abschnitt 3.3.5 näher eingegangen.

$$\dot{\epsilon}_{pl}(t) = \text{Mittelwert} \left\{ \dot{\epsilon} \left(t_{R_{p3\%}} \right) \dots \dot{\epsilon} \left(t_{R_{p10\%}} \right) \right\}. \quad (3.8)$$

4 Auswertung und Interpretation

4.1 Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit

Auf Basis der ermittelten Daten aus Basis- und dynamischer Charakterisierung soll nun der Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Parameter, die mechanischen Kennwerte des Zugversuchs sowie die Werkstoffeigenschaften Fließplateaulänge, Verfestigungsverhalten und Streckgrenzenverhältnis, untersucht werden. Da es sich bei den in den Abschnitten 3.2 und 3.3 ermittelten Fließkurven um eine große Anzahl handelt, werden die Ergebnisse nur anhand ausgewählter charakteristischer Fließkurven diskutiert.

Für die Diskussion der in den folgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse sollen zwei Dehnratenbereiche definiert werden:

- Dehnratenbereich I: $\dot{\epsilon}_{pl} < 20/s$
- Dehnratenbereich II: $\dot{\epsilon}_{pl} > 10/s$.

Aus vorgehenden Untersuchungen wurde ersichtlich, dass sich das dehnratenabhängige Werkstoffverhalten beim Übergang von Dehnratenbereich I zu II, beispielsweise hinsichtlich der Dehnratenempfindlichkeit (siehe Abbildung 27), merklich verändert. Der Übergang wird im Bereich zwischen $10/s < \dot{\epsilon}_{pl} < 20/s$ angenommen.

4.1.1 Streckgrenze

Nach DIN EN ISO 26203-2 [20] wird in Hochgeschwindigkeitsversuchen die obere Streckgrenze nicht als repräsentativer Werkstoffkennwert angesehen. Die untere Streckgrenze hingegen wird in Abgrenzung zum quasistatischen Zugversuch nach DIN EN ISO 6982-1 [30] nicht als Spannungsminimum sondern als Mittelwert der Spannungsschwankungen im Bereich des Fließplateaus definiert. Dies ist sinnvoll, da aufgrund der auftretenden Schwingungen im Kraftsignal die Bestimmung von repräsentativen Einzelwerten mit Unsicherheiten verbunden ist. Die in dieser Arbeit gezeigten unteren Streckgrenzen R_{eL} wurden somit entsprechend DIN EN ISO 26203-2 [20] ermittelt.

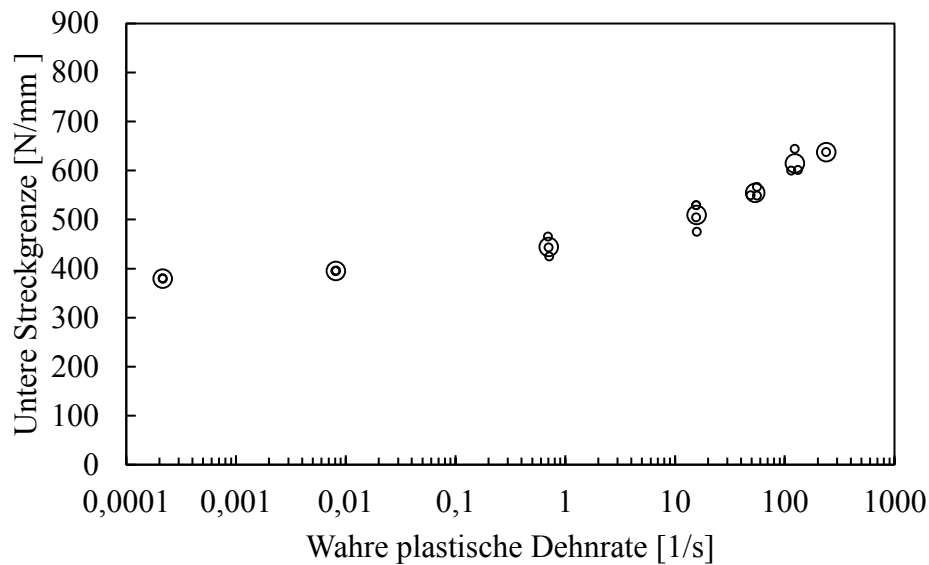


Abbildung 10: Entwicklung der unteren Streckgrenze über die wahre plastische Dehnrade.
Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

Die untere Streckgrenze R_{eL} nimmt mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit bei allen untersuchten Werkstoffen zu. Abbildung 10 zeigt beispielhaft für Material CL die Entwicklung der unteren Streckgrenze R_{eL} über die wahre plastische Dehnrade $\dot{\epsilon}_{pl}$.

Eine einfache Möglichkeit, die Veränderung eines Wertes infolge der Veränderung der Dehnrade darzustellen, ist die Normierung des dynamischen auf den quasistatischen Wert. Der dynamische Erhöhungsfaktor DF der unteren Streckgrenze R_{eL} berechnet sich wie folgt:

$$DF(R_{eL}) = \frac{R_{eL,dyn.}}{R_{eL,stat.}} \quad (4.1)$$

Der dynamische Erhöhungsfaktor stellt keinen Werkstoffkennwert dar, ermöglicht jedoch die Untersuchung und den direkten Vergleich der untersuchten Werkstoffe trotz der jeweils unterschiedlichen quasistatischen unteren Streckgrenzen. Abbildung 11 zeigt eine Übersicht der ermittelten dynamischen Erhöhungsfaktoren der unteren Streckgrenzen $DF(R_{eL})$ für alle untersuchten Baustähle und Dehnraten.

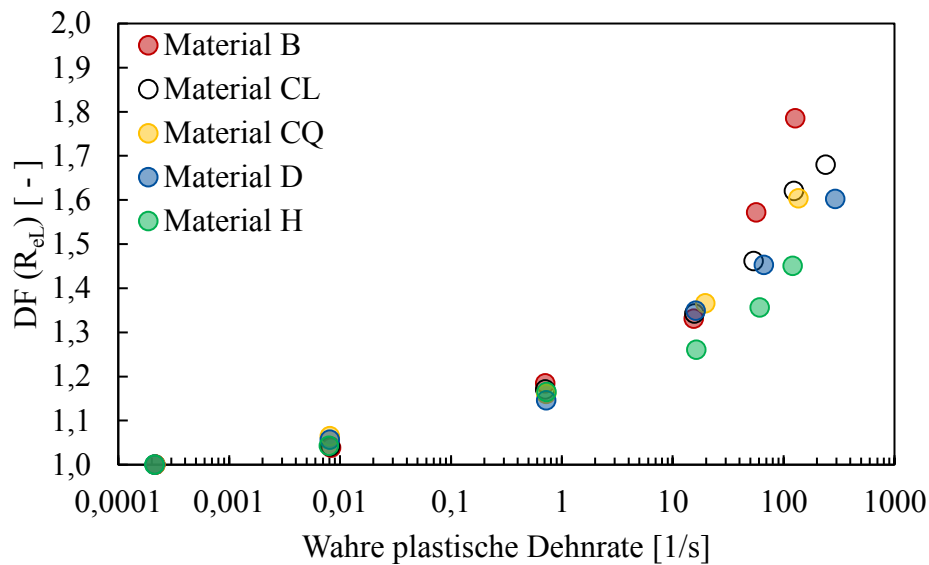


Abbildung 11: Entwicklung der dynamischen Erhöhungsfaktoren der unteren Streckgrenze über die wahre plastische Dehnrate. Darstellung arithmetischer Mittelwerte.

Aus Gründen der Übersicht sind lediglich die arithmetischen Mittel und keine Einzelwerte dargestellt. Die arithmetischen Mittelwerte der dynamischen Erhöhungsfaktoren $DF(R_{eL})$ und der wahren plastischen Dehnraten $\dot{\epsilon}_{pl}$ wurden gruppenweise je nomineller Dehnrate $\dot{\epsilon}_{nom}$ gebildet. Für den Vergleich der verschiedenen Baustähle soll Material CL als Referenz dienen. In Abbildung 13 sind die auf Material CL bezogenen relativen Abweichungen der dynamischen Erhöhungsfaktoren der unteren Streckgrenze für alle untersuchten Stähle über die nominelle Dehnrate dargestellt. Die anhand von Abbildung 12 gezeigten Unterschiede der untersuchten Baustähle sind in dieser Darstellungsform deutlich erkennbar.

Bei den untersuchten Baustählen der Stahlgüte S355J2+N, Materialien B, CL und D, sind lediglich geringe Unterschiede hinsichtlich des dehnratenabhängigen Verhaltens auszumachen (siehe Abbildung 12 links). Im relativen Vergleich der dynamischen Erhöhungsfaktoren $DF(R_{eL})$ bezogen auf Material CL zeigen sich in Dehnratenbereich I, bei nominellen Dehnraten $\dot{\epsilon}_{nom} < 20/s$, nur geringe Unterschiede von maximal 2,4 % bei Material CQ. In Dehnratenbereich II, bei nominellen Dehnraten $\dot{\epsilon}_{nom} > 10/s$, beträgt die maximale Differenz 12,8 %.

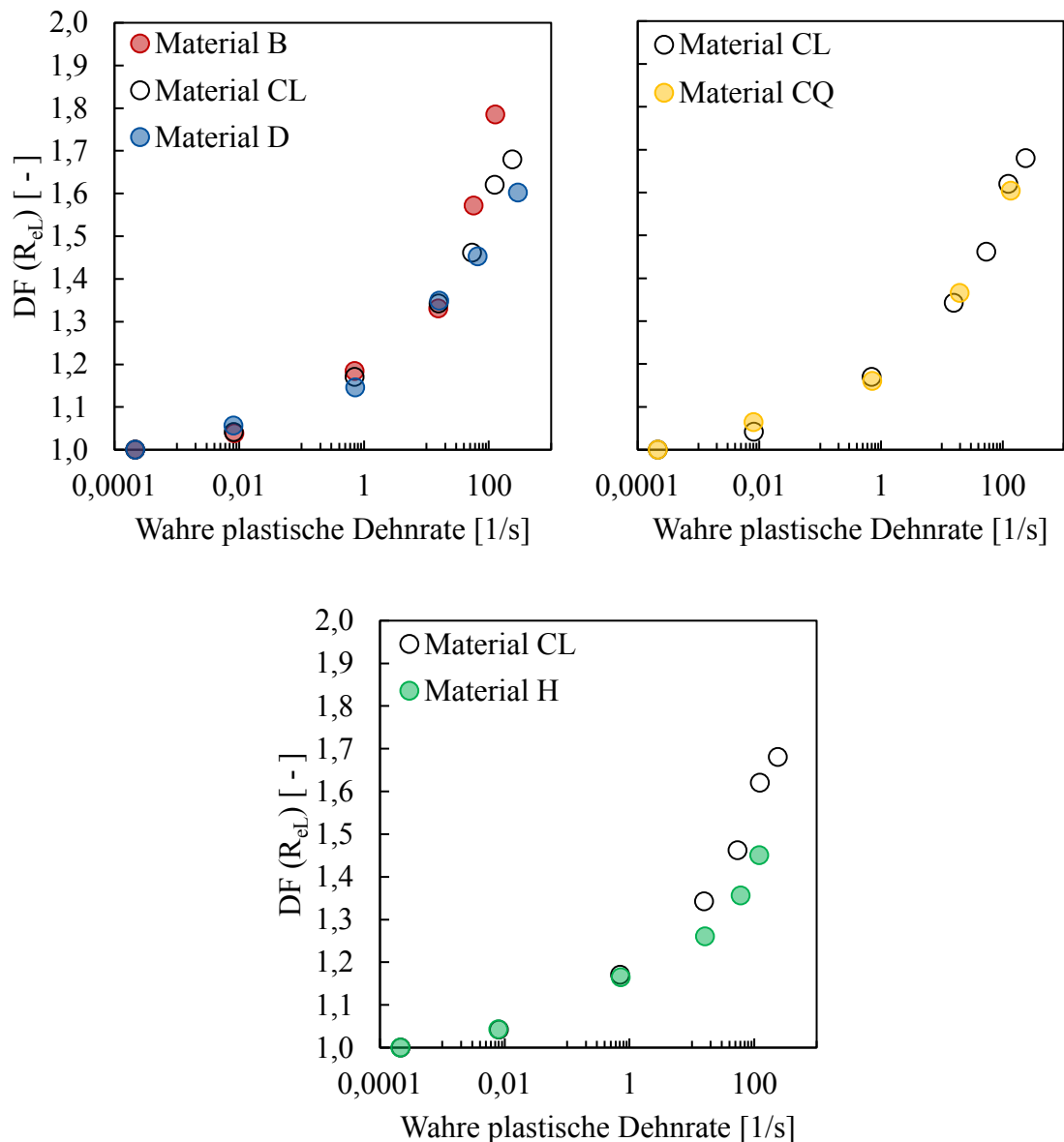


Abbildung 12: Entwicklung der dynamischen Erhöhungsfaktoren der unteren Streckgrenze über die wahre plastische Dehnrate. Darstellung von arithmetischen Mittelwerten. Links: Material B, CL und D. Rechts: Material CL und CQ. Mitte: Material CL und H.

In der Tendenz zeigt Material D im Bereich sehr hoher wahrer plastischer Dehnraten ($\dot{\epsilon}_{pl} > 100/s$) niedrigere Erhöhungsfaktoren als die Materialien B, CL und CQ. Umgekehrt zeigt Material B in Dehnratenbereich II höhere relative Spannungszuwächse je Dehnratenzuwachs im Vergleich zu den Materialien CL, CQ und D. Dies soll in Abschnitt 4.2 anhand der Dehnratenempfindlichkeit der unteren Streckgrenze näher untersucht werden.

Die Unterschiede im Vergleich der Längs- und Querrichtung für Material C (Materialien CL und CQ) liegen innerhalb der Streuung der Einzelwerte (siehe Abbildung 14 rechts). Auch bei Betrachtung der Mittelwerte (siehe Abbildung 12 rechts) lassen sich keine eindeutigen Tendenzen oder Unterschiede feststellen. Die maximal auftretende Differenz liegt bei 2,2 %. Bezüglich der unteren Streckgrenze kann somit vermutet werden, dass keine Richtungsabhängigkeit in Bezug auf die Walzrichtung vorliegt. Dies bestätigt den Befund nach Langseth et al. [15], die in ihrer Arbeit ebenfalls einen Baustahl St 52-3 längs und quer zur Walzrichtung untersuchten.

Der Vergleich von Material H zu Material CL zeigt in Dehnratenbereich I nahezu keine Unterschiede zwischen beiden Materialien. In Dehnratenbereich II liegen die auftretenden Unterschiede in einem Bereich zwischen 6,1 % und 10,5 %. In diesem Bereich zeigt Material H einen geringeren Spannungsanstieg im Vergleich zu Material CL. Auch im Vergleich zu den weiteren untersuchten normalisierten Baustählen, Materialien B und D, ist diese Tendenz zu beobachten. Dies entspricht zunächst den Erkenntnissen der bisherigen Arbeiten (siehe Abschnitt 2.2.2) und lässt sich auf die höhere Festigkeit sowie die unterschiedliche Wärmebehandlung und die sich daraus ergebenden Werkstoffeigenschaften zurückführen.

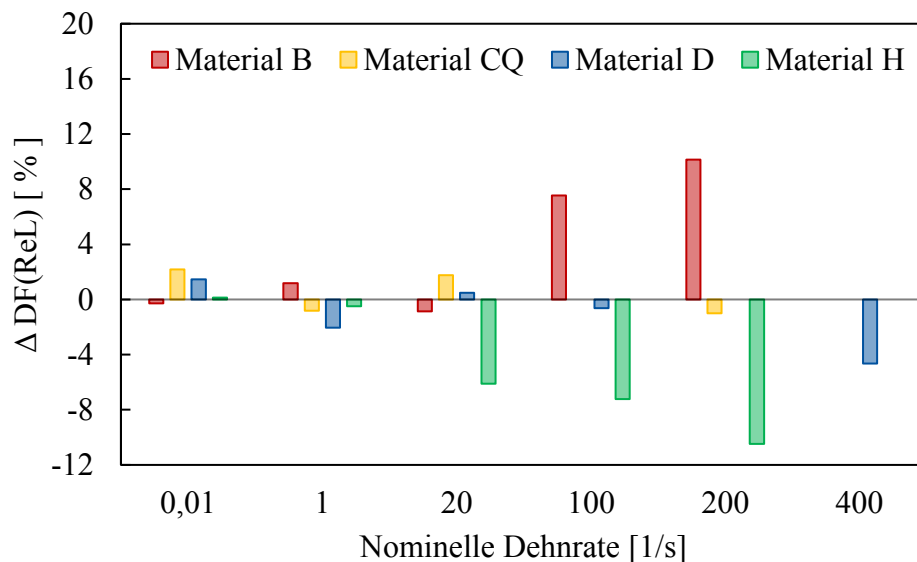


Abbildung 13: Relative Abweichungen der dynamischen Erhöhungsfaktoren der unteren Streckgrenze bezogen auf Material CL über die nominelle Dehnrate.

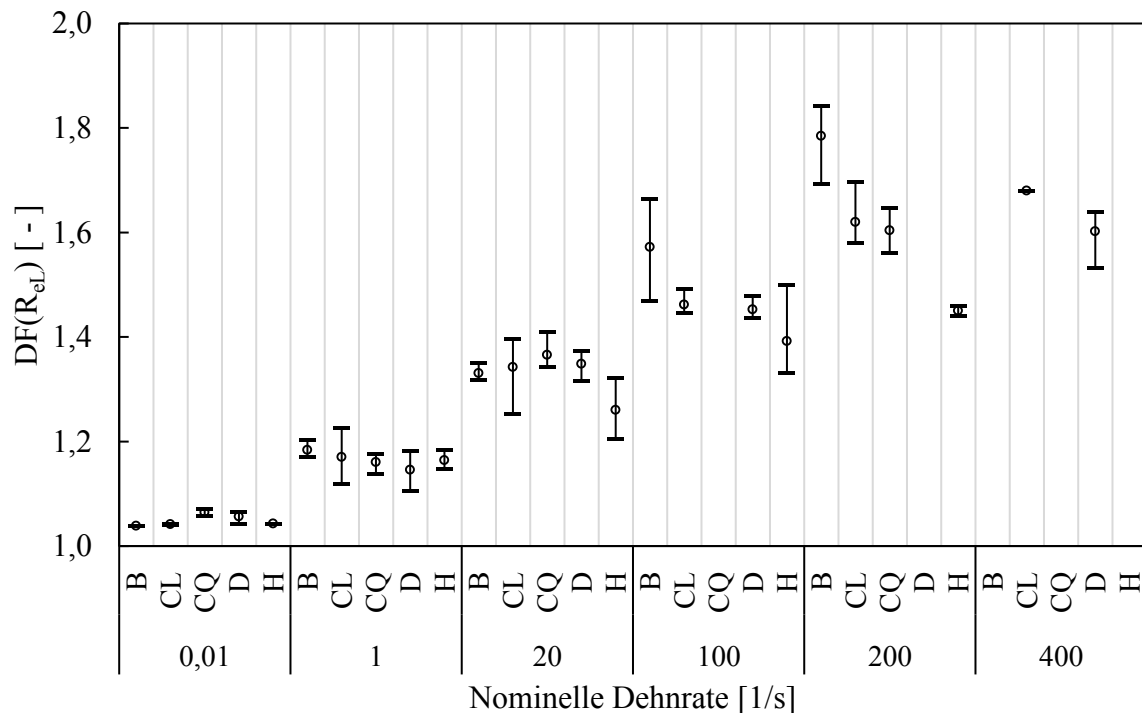


Abbildung 14: Übersicht dynamische Erhöhungsfaktoren der unteren Streckgrenze.
Materialien B, CL, CQ, D und H.

Abbildung 14 zeigt eine Übersicht der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der dynamischen Erhöhungsfaktoren $DF(R_{eL})$ über die nominelle Dehnrates. Die Unterschiede insbesondere für Dehnratesbereich I liegen teilweise innerhalb der Streuung der Messwerte. Deutlich erkennbar ist die zunehmende Streuung der ermittelten Werte bei höheren Dehnrates. Bei Betrachtung der Mittelwerte wird jedoch die im Vergleich zu den anderen untersuchten Baustählen größere Dehnratesverfestigung bei Material B insbesondere bei nominellen Dehnrates $\dot{\epsilon}_{nom} > 20/s$ deutlich. Während die Unterschiede der dynamischen Erhöhungsfaktoren $DF(R_{eL})$ für Material H in Dehnratesbereich I vernachlässigbar sind, zeigt sich in Dehnratesbereich II eine geringere Dehnratesverfestigung im Vergleich zu den drei Chargen S355J2+N.

4.1.2 Dehngrenzen und Zugfestigkeit

Nach aktuellem Kenntnisstand kann davon ausgegangen werden, dass die Dehnratesempfindlichkeit, d.h. der Spannungszuwachs bei Erhöhung der Dehnrates, mit zunehmendem Verformungsniveau abnimmt (siehe Abschnitt 2.1.3). Dies soll für die in dieser Arbeit untersuchten Baustähle überprüft werden.

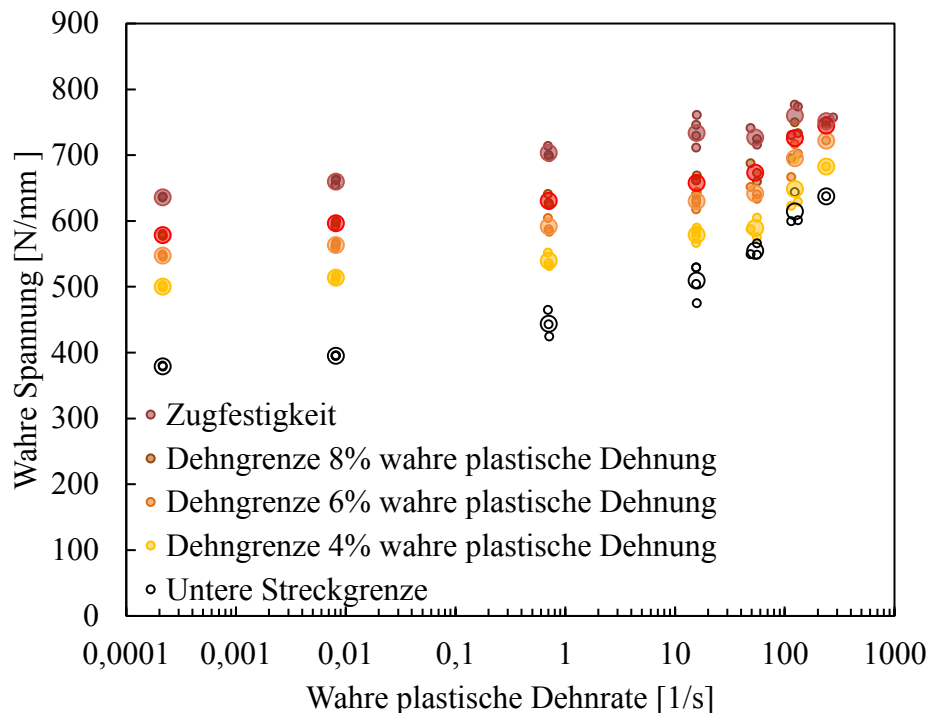


Abbildung 15: Entwicklung der unteren Streckgrenze, der Dehngrenzen $R_{p4\%}$ bis $R_{p8\%}$ und der Zugfestigkeit über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

Abbildung 15 zeigt die Entwicklung der Dehngrenzen $R_{p4\%}$, $R_{p6\%}$ und $R_{p8\%}$ der unteren Streckgrenze R_{eL} und der Zugfestigkeit R_m über die wahre plastische Dehnrates beispielhaft für Material CL. Die im Folgenden dargestellten Effekte lassen sich jedoch auf alle in dieser Arbeit untersuchten Baustähle übertragen.

Es wird deutlich, dass die untere Streckgrenze deutlich stärker auf die Änderung der Beanspruchungsgeschwindigkeit reagiert, als die beispielhaft dargestellten Dehngrenzen und in besonderem Maße die Zugfestigkeit. Die Entwicklung der Festigkeitswerte über die wahre plastische Dehnrates ändert von einem überproportionalen Anstieg bei der unteren Streckgrenze zu einer annähernd linear-logarithmischen Beziehung bei der Zugfestigkeit. Noch deutlicher wird dies bei Betrachtung der daraus abgeleiteten dynamischen Erhöhungsfaktoren. In Abbildung 16 ist eine Übersicht der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der dynamischen Erhöhungsfaktoren für die in Abbildung 15 gezeigten Festigkeitswerte dargestellt.

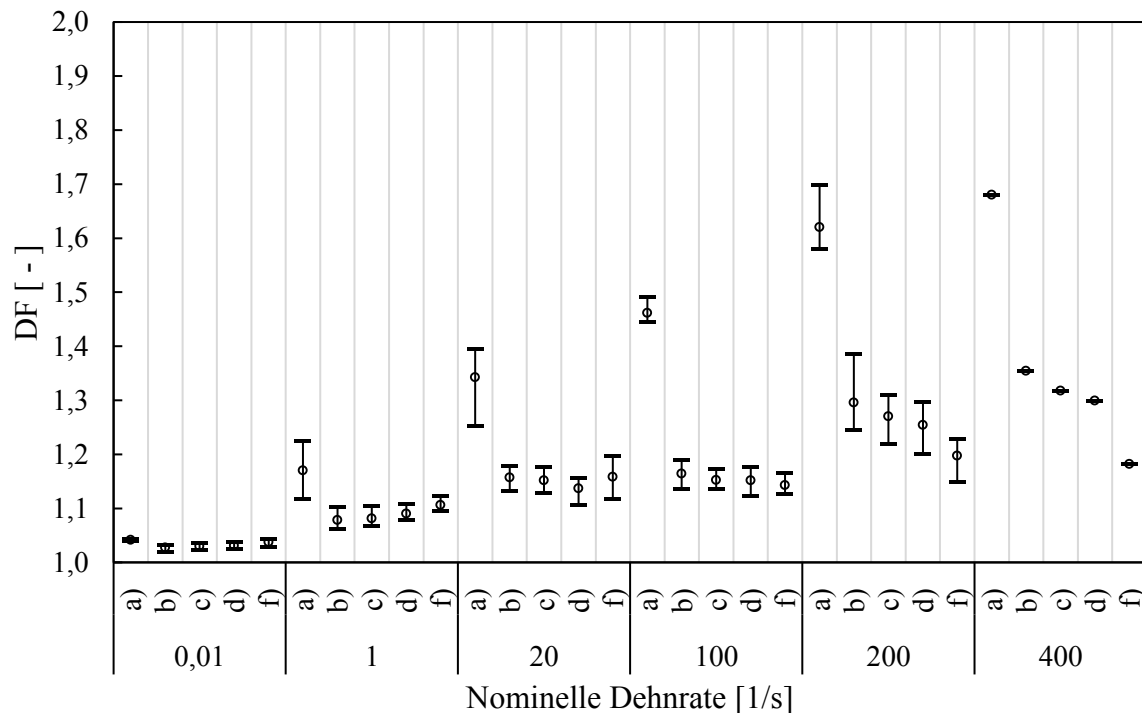


Abbildung 16: Entwicklung der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der dynamischen Erhöhungsfaktoren DF für a) R_{eL} , b) $R_{p4\%}$, c) $R_{p6\%}$, d) $R_{p8\%}$, f) R_m in Abhängigkeit der nominellen Dehnrates. Material CL - S355J2+N.

Die Sortierung erfolgt gruppenweise nach nomineller Dehnrates sowie nach Verformungsniveau von a) unterer Streckgrenze R_{eL} bis f) Zugfestigkeit R_m . Die dynamischen Erhöhungsfaktoren DF nehmen mit zunehmendem Verformungsniveau von unterer Streckgrenze R_{eL} zu Zugfestigkeit R_m ab. Bei Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit steigt das allgemeine Werteniveau an und die Differenzen zwischen den Erhöhungsfaktoren werden größer. Eine Abstufung der Erhöhungsfaktoren ist bereits bei Dehnrates $> 0,01/s$ über das Maß der Streuung hinaus erkennbar. Die Erhöhungsfaktoren der unteren Streckgrenze setzen sich deutlich von anderen Werten ab. Bei höheren Verformungsniveaus (siehe Abbildung 16 b) - f)) sind dagegen erst bei Dehnrates $> 100/s$ Unterschiede erkennbar, die über das Maß der Streuung hinausgehen. Die Abstufung der Werte b) bis f) ist im Vergleich zur Abstufung der unteren Streckgrenze R_{eL} von den übrigen Werten deutlich schwächer ausgeprägt. Die relative Differenz zwischen $DF(R_{p4\%})$ und $DF(R_m)$ steigt von 2,3 % bei Dehnrates 100/s auf 14,7 % bei Dehnrates 400/s an. Dagegen steigt die relative Differenz zwischen $DF(R_{eL})$ und $DF(R_m)$ von 27,8 % bei Dehnrates 100/s auf 42,8 % bei Dehnrates 400/s an.

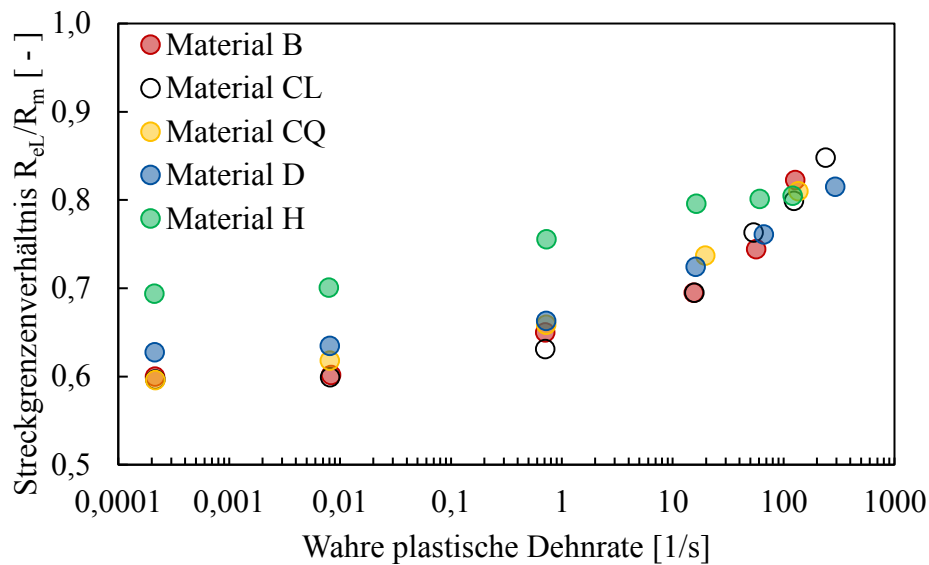


Abbildung 17: Entwicklung des Streckgrenzenverhältnisses über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung arithmetischer Mittelwerte.

In Übereinstimmung mit dem bisherigen Kenntnisstand (siehe Abschnitt 2.1.3) kann somit befunden werden, dass die Dehnratesempfindlichkeit mit Zunahme des Verformungsniveaus abnimmt und bei der unteren Streckgrenze besonders ausgeprägt ist.

Abbildung 17 zeigt die Entwicklung der ermittelten Streckgrenzenverhältnisse über die wahre plastische Dehnrates. Infolge der unterschiedlichen Dehnratesempfindlichkeiten von Streckgrenze und Zugfestigkeit nimmt die Differenz zwischen beiden Werten mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit ab, während das Streckgrenzenverhältnis R_{eL}/R_m entsprechend zunimmt. Die Zunahme fällt umso geringer aus, je höher die bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelte untere Streckgrenze des Baustahls ist. Der bisherige Stand der Literatur kann somit bestätigt werden (siehe bspw. Forni et al. [29] und Krabiell [9]).

4.1.3 Verfestigung

Wie in Abschnitt 2.1.4 erläutert wurde, stellt die Verfestigung $\Delta\sigma_w/\Delta\varepsilon_{w,pl}$ die Steigung der Fließkurve im Verfestigungsbereich dar. Die Verfestigung ist über die Versuchsdauer nicht konstant und abhängig von dem Verformungsniveau und der Verformungsgeschwindigkeit. Um das generelle Verfestigungsverhalten verschiedener Stähle in Abhängigkeit der Beanspruchungsgeschwindigkeit beschreiben und

untereinander vergleichen zu können, definierte Falk [25] eine mittlere Verfestigung (siehe Abschnitt 2.1.4). In dieser Arbeit soll die mittlere Verfestigung jedoch anhand des gesamten Verfestigungsbereiches zwischen Lüdersdehnung $A_{Lü}$ und Gleichmaßdehnung A_{GI} bestimmt werden:

$$MV = \frac{R_m - R_{eL}}{A_{GI} - A_{Lü}} \quad (4.2)$$

In Abbildung 18 ist beispielhaft für Material CL die Entwicklung der Einzel- und Mittelwerte der mittleren Verfestigung über die wahre plastische Dehnrage aufgetragen. Die mittlere Verfestigung wird im Allgemeinen weniger stark durch die Veränderung der Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst, als andere Werkstoffkennwerte wie beispielsweise die untere Streckgrenze R_{eL} oder die Zugfestigkeit R_m . Die relativen Unterschiede liegen im Maximum unter 30 %.

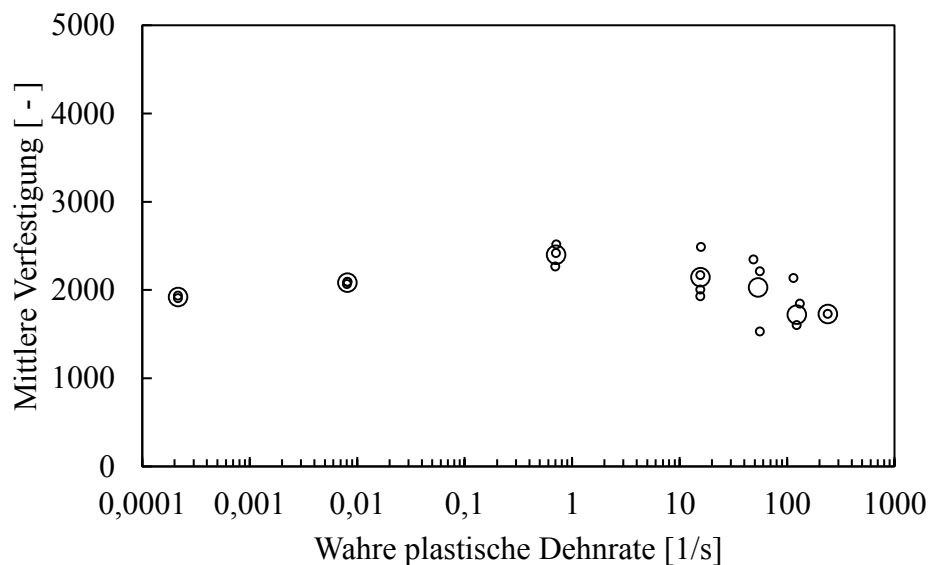


Abbildung 18: Entwicklung der mittleren Verfestigung über die wahre plastische Dehnrage. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

Alle untersuchten normalisierten Baustähle, Materialien B, CL, CQ und D zeigen in Dehnratenbereich I geringe Unterschiede von maximal 9 % (siehe Abbildung 19, links und rechts). Die Werte steigen bis zu einer nominellen Dehnrates $\dot{\epsilon}_{\text{nom}} = 1/\text{s}$ leicht an und fallen dann unter Zunahme der Streuung ab. Material H zeigt in Dehnratenbereich I zunächst einen ähnlichen Verlauf mit leicht ansteigenden Werten der mittleren Verfestigung MV (siehe Abbildung 19, mittig).

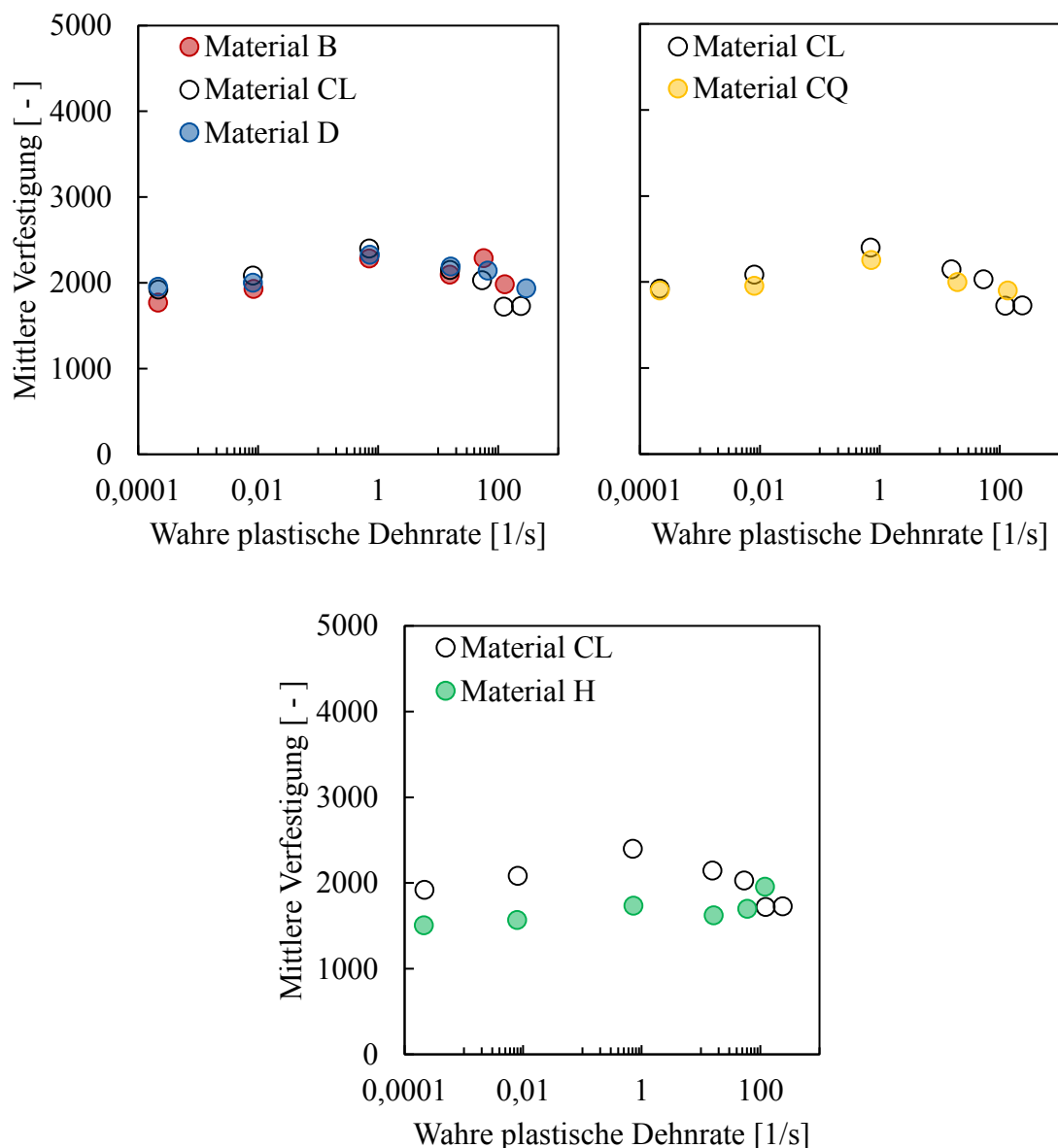


Abbildung 19: Entwicklung der mittleren Verfestigung MV über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung von arithmetischen Mittelwerten. Links: Material B, CL und D. Rechts: Material CL und CQ. Mitte: Material CL und H.

In Dehnratenbereich II ist dagegen eine nahezu konstante mittlere Verfestigung erkennbar. Da die Streuung der Werte mit Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit zunimmt, kann hier jedoch lediglich von einer Tendenz die Rede sein. Generell und insbesondere in Dehnratenbereich I weist der thermomechanisch gewalzte Baustahl ein niedrigeres Wertenniveau auf im Vergleich zu den normalisierten Baustählen. Dies lässt sich insbesondere auf die im Vergleich zu den Materialien B, CL, CQ und D geringere Dehnratenempfindlichkeit der Lüdersdehnung zurückführen (siehe Abschnitt 4.1.4).

In Übereinstimmung mit dem Befund von Falk [25] nimmt die mittlere Verfestigung bei Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit zunächst leicht zu und fällt dann bei starker Zunahme der Streuung wieder leicht ab. Falk führt dies allein auf die einsetzende Temperaturerhöhung der Probe aufgrund von adiabatischen Verformungsbedingungen zurück. Tatsächlich kann nicht ohne weitere Untersuchungen angegeben werden, zu welchen Teilen die Beeinflussung der Verfestigung durch die gegenläufigen Effekte der einsetzenden thermischen Entfestigung und der Dehnratenverfestigung stattfindet. Eine Rückführung der mit zunehmender Dehnraten abnehmenden mittleren Verfestigung alleine aufgrund der adiabatischen Verformungsbedingungen erscheint angesichts der in dem vorhergehenden Kapitel gezeigten unterschiedlichen Dehnratenempfindlichkeiten von Zugfestigkeit und Streckgrenze nicht realistisch.

Nach Krabiell [9] kann angenommen werden, dass der Übergang von isothermer zu adiabatischer Verformung ohne aktive Kühlung der Proben bei einer wahren plastischen Dehnraten $10^{-4}/s < \dot{\epsilon}_{pl} < 10^{-2}/s$ stattfindet. Demnach müsste die Verfestigung bei weiterer Erhöhung der Dehnraten infolge der thermischen Entfestigung zunehmend geringer werden. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Werkstoffen trifft dies nicht zu. Es kann daher angenommen werden, dass der gegenläufige Effekt der Dehnratenverfestigung bis in den mittleren Dehnratenbereich überwiegt und erst bei Dehnraten $\dot{\epsilon}_{pl} > 10/s$ der Effekt der thermischen Entfestigung maßgebend wird.

4.1.4 Lüdersdehnung

Die experimentelle Ermittlung der Lüdersdehnung gilt als aufwändig. Schwierigkeiten bestehen vor allem in der exakten Bestimmung von Anfang und Ende des Fließplateaus. In dieser Arbeit wurden die Lüdersdehnungen auf Grundlage des in Abschnitt 3.3.5 beschriebenen lokalen Messprinzips bestimmt. Der damit gemessene Verlauf der nicht-

integralen Verformung der Messlänge erlaubt die Bestimmung von Fließ- und Verfestigungsbeginn und somit die Ermittlung der Fließplateaulänge bzw. der Lüdersdehnung (siehe Abbildung 9). Dies ist bei einem integralen Verformungsmessprinzip, bspw. mithilfe eines Laser-Extensometers wie es vielfach bei Hochgeschwindigkeitszugversuchen eingesetzt wird, nicht möglich.

Abbildung 20 zeigt die Entwicklung der Einzel- und Mittelwerte der Lüdersdehnung über die wahre plastische Dehnrates beispielhaft für Material CL. Die im Folgenden dargestellten Effekte lassen sich jedoch auf alle in dieser Arbeit untersuchten Baustähle übertragen. Bei den untersuchten Baustählen entspricht die Entwicklung der Lüdersdehnung über die wahre plastische Dehnrates qualitativ der der unteren Streckgrenze. Die in der Arbeit von Böttcher [16] durchgeführten Versuche lassen sich insgesamt Dehnratesbereich I zuordnen. Hierfür befindet er zunächst in Übereinstimmung mit den in dieser Arbeit ermittelten Werten eine linear-logarithmische Abhängigkeit der Lüdersdehnung zur wahren plastischen Dehnrates. Bei Betrachtung des sich anschließenden Dehnratesbereichs II lässt sich jedoch ein überproportionaler Anstieg der Lüdersdehnung über den Logarithmus der wahren plastischen Dehnrates feststellen.

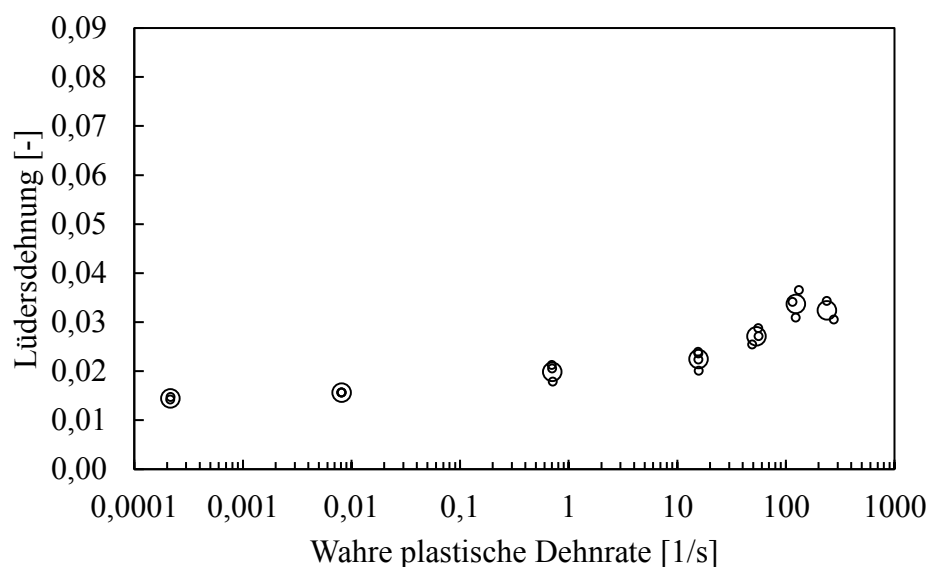


Abbildung 20: Entwicklung der Lüdersdehnung über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

Alle drei untersuchten Baustähle S355J2+N mit Entnahme der Probe längs zur Walzrichtung, Materialien B, CL und D, zeigen qualitativ ähnliche Entwicklungen der Werte über die Dehnrage (siehe Abbildung 21 links). Im Vergleich zu den Materialien B und CL zeigt Material D jedoch entsprechend der leicht höheren unteren Streckgrenze bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ein generell etwas höheres Wertenniveau. Im Vergleich der Materialien CL und CQ sind die Unterschiede vergleichsweise gering (siehe Abbildung 21 rechts). Es kann somit von einer geringen Richtungsabhängigkeit des dehnratenabhängigen Verhaltens in Bezug auf die Lüdersdehnung ausgegangen werden. Im Vergleich der unterschiedlichen Herstellungsverfahren zeigen sich deutliche Unterschiede. Die Lüdersdehnung des thermomechanisch gewalzten Baustahls, Material H, ist generell größer als bei dem normalisierten Stahl, Material CL. Zudem weist Material H eine deutlich geringere Zunahme der Lüdersdehnung bei Dehnraterhöhung auf als Material CL, was auf die thermomechanische Wärmebehandlung zurückgeführt werden kann (vgl. Abschnitt 2.1.5 und 2.2.2). Dies kann im Zusammenhang mit der im Vergleich zu Material CL geringeren Korngröße und der entsprechend der Hall-Petch-Beziehung höheren Festigkeit gesehen werden (vgl. Tsuchida [38]). Die Entwicklung der Lüdersdehnung lässt sich für Material H durch eine annähernd linear-logarithmische Beziehung beschreiben, während bei den normalisierten Baustählen, Materialien B, CL, CQ und D, ein überproportionaler Anstieg über den Logarithmus der wahren plastischen Dehnrage erkennbar ist.

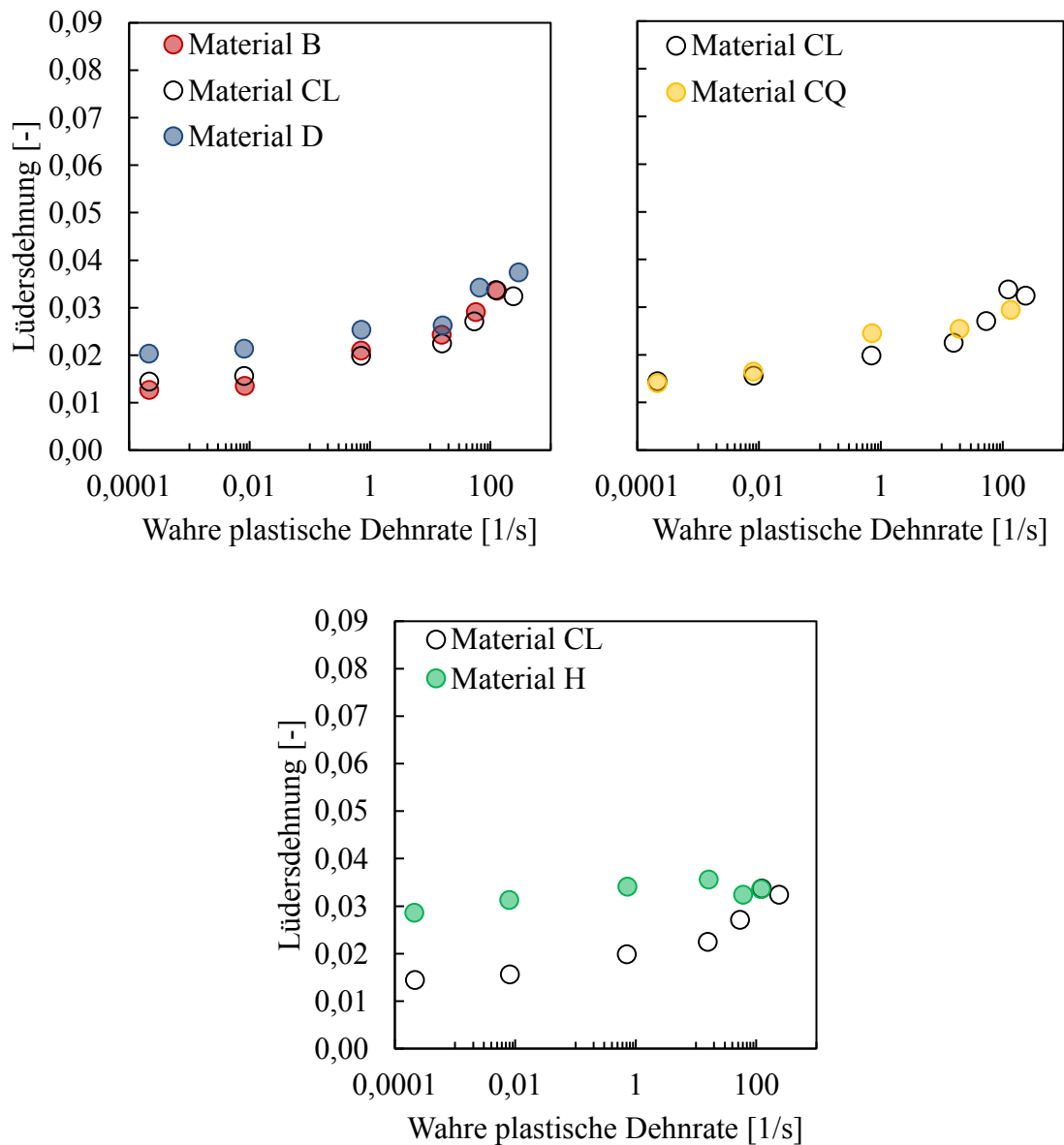


Abbildung 21: Entwicklung der Lüdersdehnung über die wahre plastische Dehnrate. Darstellung von arithmetischen Mittelwerten. Links: Material B, CL und D. Rechts: Material CL und CQ. Mitte: Material CL und H.

Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Baustählen entspricht die Beziehung zwischen Lüdersdehnung und wahrer plastischer Dehnrate in Dehnratenbereich II bei dem thermomechanisch gewalzten Baustahl, Material H, somit nicht der Entwicklung der unteren Streckgrenze (vgl. Abbildung 12) über die wahre plastische Dehnrate.

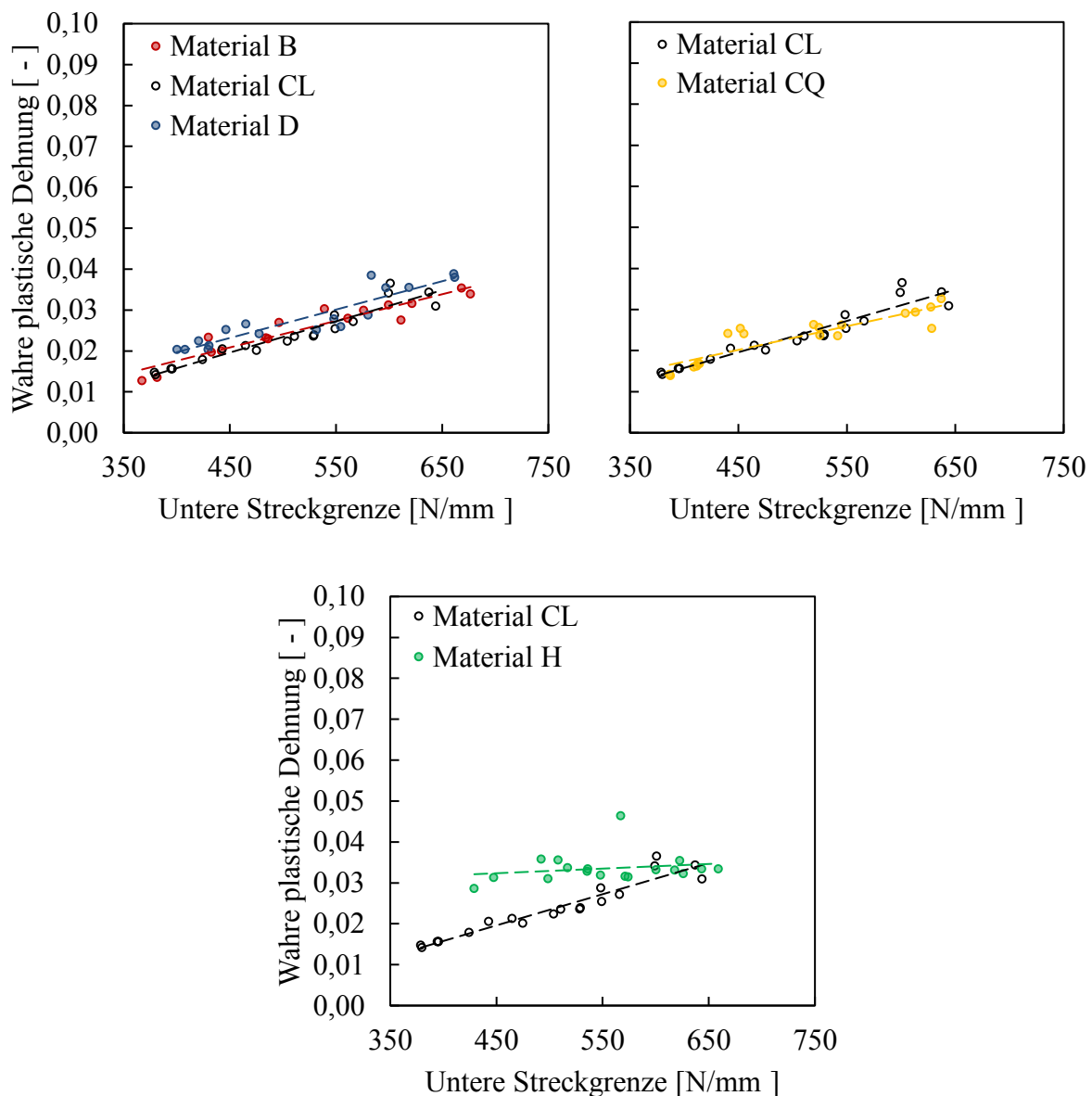


Abbildung 22: Entwicklung der Lüdersdehnung über die untere Streckgrenze. Links: Material B, CL und D. Rechts: Material CL und CQ. Mitte: Material CL und H.

Es ist erkennbar, dass die Entwicklung der Lüdersdehnung über die wahre plastische Dehnrate qualitativ der Entwicklung der unteren Streckgrenze entspricht. Bei Darstellung der Lüdersdehnung über die untere Streckgrenze (siehe Abbildung 22) lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Kennwerten erkennen, der durch eine Regressionsgerade approximiert werden kann (gestrichelte Linien). Im direkten Vergleich zwischen den Materialien B, CL und D zeigt sich, dass die Regressionsgeraden nahezu identische Steigungen aufweisen (siehe Abbildung 22 links). Die Lüdersdehnung zeigt

somit qualitativ ein ähnliches dehnratenabhängiges Verhalten wie die untere Streckgrenze. Dabei kann von einem linearen Zusammenhang zwischen Lüdersdehnung und unterer Streckgrenze ausgegangen werden. Abgesehen von den generell leicht höheren Werten der Lüdersdehnung im Vergleich zu den anderen normalisierten Baustählen aus dem Versuchsprogramm, sind lediglich geringe Unterschiede erkennbar. Im Vergleich der Materialien CL und CQ zeigen sich ebenfalls sehr geringe Unterschiede sowohl hinsichtlich der Steigung, als auch bezüglich der absoluten Werte (siehe Abbildung 22 rechts). Deutliche Unterschiede zeigen sich im Vergleich von Materialien CL und H (siehe Abbildung 22 mittig). Die Lüdersdehnung des thermomechanisch gewalzten Baustahls weist eine deutlich geringere Zunahme über die untere Streckgrenze auf. Die lineare Regressionsgerade verläuft somit deutlich flacher im Vergleich zu Material CL.

4.1.5 Gleichmaßdehnung

Die Gleichmaßdehnungen wurden anhand der Spannungs-Dehnungs-Diagramme entsprechend Abschnitt 2.1.6 bestimmt. Die Bestimmung der Gleichmaßdehnung über das Kraftmaximum stellte sich teilweise als problematisch heraus, da das Maximum der Kurve teilweise wenig ausgeprägt war und eher einem Maximalplateau entsprach. In dieser Arbeit wurde die Gleichmaßdehnung daher als Mittelwert der am Anfang und am Ende des Maximalplateaus gemessenen Verformung bestimmt.

Abbildung 23 zeigt die Entwicklung der Einzel- und Mittelwerte der Gleichmaßdehnung über die wahre plastische Dehnrates beispielhaft für Material B. Für alle untersuchten Werkstoffe konnte beobachtet werden, dass die Gleichmaßdehnung bei einem Anstieg der Beanspruchungsgeschwindigkeit abnimmt.

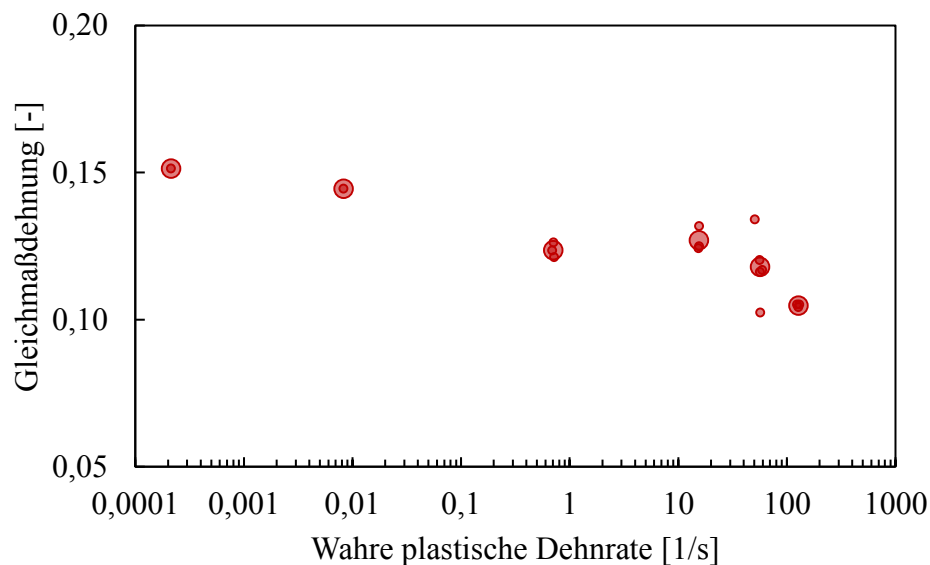


Abbildung 23: Entwicklung der Gleichmaßdehnung über die wahre plastische Dehnrate. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material B - S355J2+N.

Die Unterschiede zwischen den drei Chargen S355J2+N sowie im Vergleich der Materialien CL und CQ sind in beiden Dehnratenbereichen vergleichsweise gering (siehe Abbildung 24, links und rechts). Auch im Vergleich zwischen Material H und Material CL (siehe Abbildung 24, Mitte) lassen sich lediglich geringe Unterschiede der Messwerte feststellen. Bezüglich der Entwicklung der Gleichmaßdehnung lassen sich für alle untersuchten Dehnraten keine eindeutigen Unterschiede zwischen den untersuchten Baustählen erkennen. Im Allgemeinen kann jedoch der derzeitige Kenntnisstand bestätigt werden, dass bei einer Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit eine Abnahme der Gleichmaßdehnung einhergeht (siehe unter anderem Krabiell [9]). Dabei kann von einer annähernd linearen Abhängigkeit zwischen der Gleichmaßdehnung und dem Logarithmus der wahren plastischen Dehnrate ausgegangen werden.

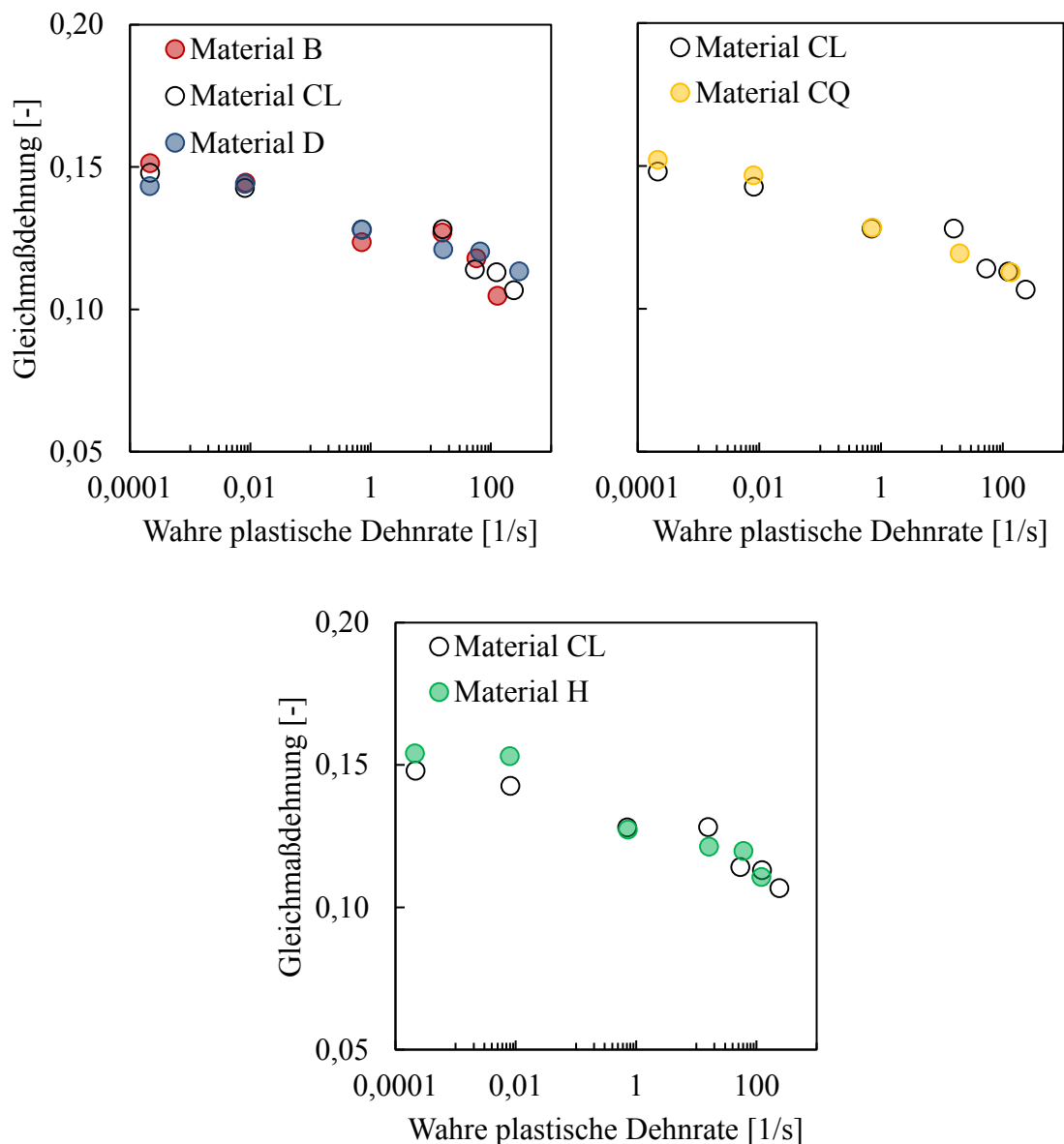


Abbildung 24: Entwicklung der Gleichmaßdehnung über die wahre plastische Dehnrate.

Darstellung von arithmetischen Mittelwerten. Links: Material B, CL und D. Rechts:

Material CL und CQ. Mitte: Material CL und H.

In Übereinstimmung des Befunds nach Belche [6] geht der Einfluss der Dehnrate im Dehnratenbereich bis 0,08/s nicht wesentlich über die Streuung der ermittelten Werte hinaus. Darüber hinaus verringert sich der Wert der Gleichmaßdehnung unter quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit bis zum Ende von Dehnratenbereich I im Mittel um etwa 14 %, bis zum Ende von Dehnratenbereich II um etwa 25 %. Nach Abschnitt 4.1.2 nimmt die Dehnratenempfindlichkeit mit einer Zunahme des

Verformungsniveaus ab und die Entwicklung der Festigkeitswerte über die wahre plastische Dehnrates verändert sich von einem überproportionalen Anstieg zu einer annähernd linear-logarithmischen Beziehung. Dies lässt sich auf die Entwicklung der Verformungskennwerte von Lüders- zu Gleichmaßdehnung übertragen. Die der unteren Streckgrenze zugeordnete Lüdersdehnung steigt in dem untersuchten Dehnratenbereich über die logarithmisch aufgetragene Dehnrates überproportional an. Über den Logarithmus der Dehnrates betrachtet nimmt die Gleichmaßdehnung dagegen nahezu linear ab, während die Zugfestigkeit nahezu linear ansteigt (siehe Abbildung 15). Die negative Dehnratesempfindlichkeit der Gleichmaßdehnung ist auf das mit Erhöhung der Dehnrates ansteigende allgemeine Spannungsniveau, somit auf die positive Dehnratesempfindlichkeit der Zugfestigkeit, zurückzuführen. Dies führt dazu, dass die Instabilitätsbedingung früher erfüllt wird (siehe Abschnitt 2.1.6).

4.1.6 Bruchdehnung

Entsprechend Abschnitt 2.1.7 wurden die Bruchdehnungen nach dem Zugversuch anhand der verbleibenden Längsverformung der Probe bestimmt. Abbildung 25 zeigt die Entwicklung der Einzel- und Mittelwerte der Bruchdehnungen über die wahre plastische Dehnrates beispielhaft für Material CL.

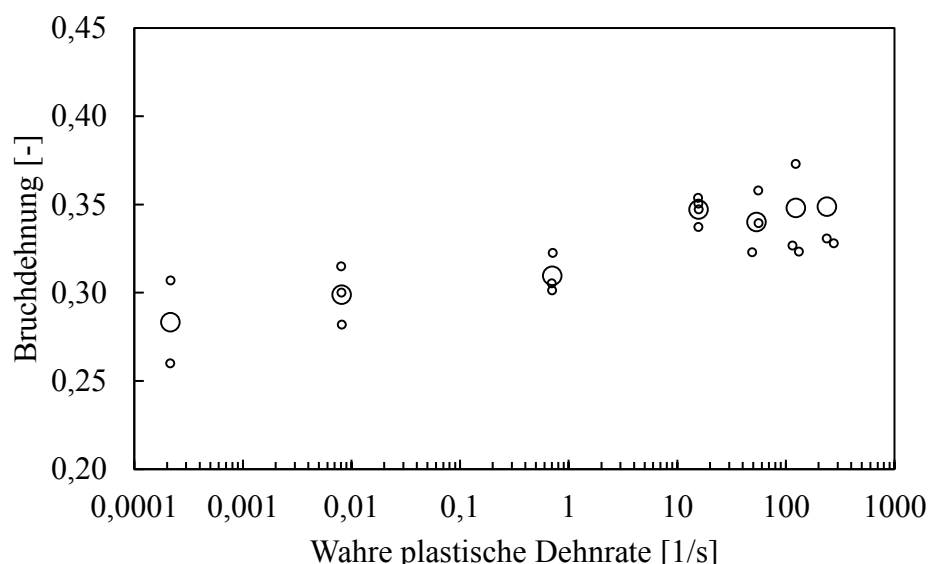


Abbildung 25: Entwicklung der Bruchdehnung über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

Bei der Betrachtung der Einzelwerte der Bruchdehnung fällt auf, dass die Streuung im Vergleich zu der Lüdersdehnung und der Gleichmaßdehnung deutlich größer ist. Zudem ist erkennbar, dass die Bruchdehnung bei allen untersuchten Baustählen mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit zunimmt (siehe Abbildung 26). Auch bei Betrachtung der Mittelwerte ist es nicht möglich zu befinden, ob die Bruchdehnung proportional oder überproportional über die logarithmisch aufgetragene Dehnrates ansteigt. In beiden Dehnratenbereichen sind die Unterschiede zwischen den untersuchten Baustählen vergleichsweise gering, bzw. sind aufgrund der stark streuenden Werte keine eindeutigen Unterschiede erkennbar.

Im Allgemeinen kann jedoch der derzeitige Kenntnisstand bestätigt werden, wonach die Bruchdehnung bei Zunahme der Beanspruchungsgeschwindigkeit zunimmt (siehe unter anderem Krabiell [9], Stark-Seuken [21], Falk [25]). Dabei nimmt der Wert der Bruchdehnung unter quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit in Dehnratenbereich I maximal um etwa 9,3 % zu. In Dehnratenbereich II konnte eine Steigung um maximal 22,8 % gemessen werden.

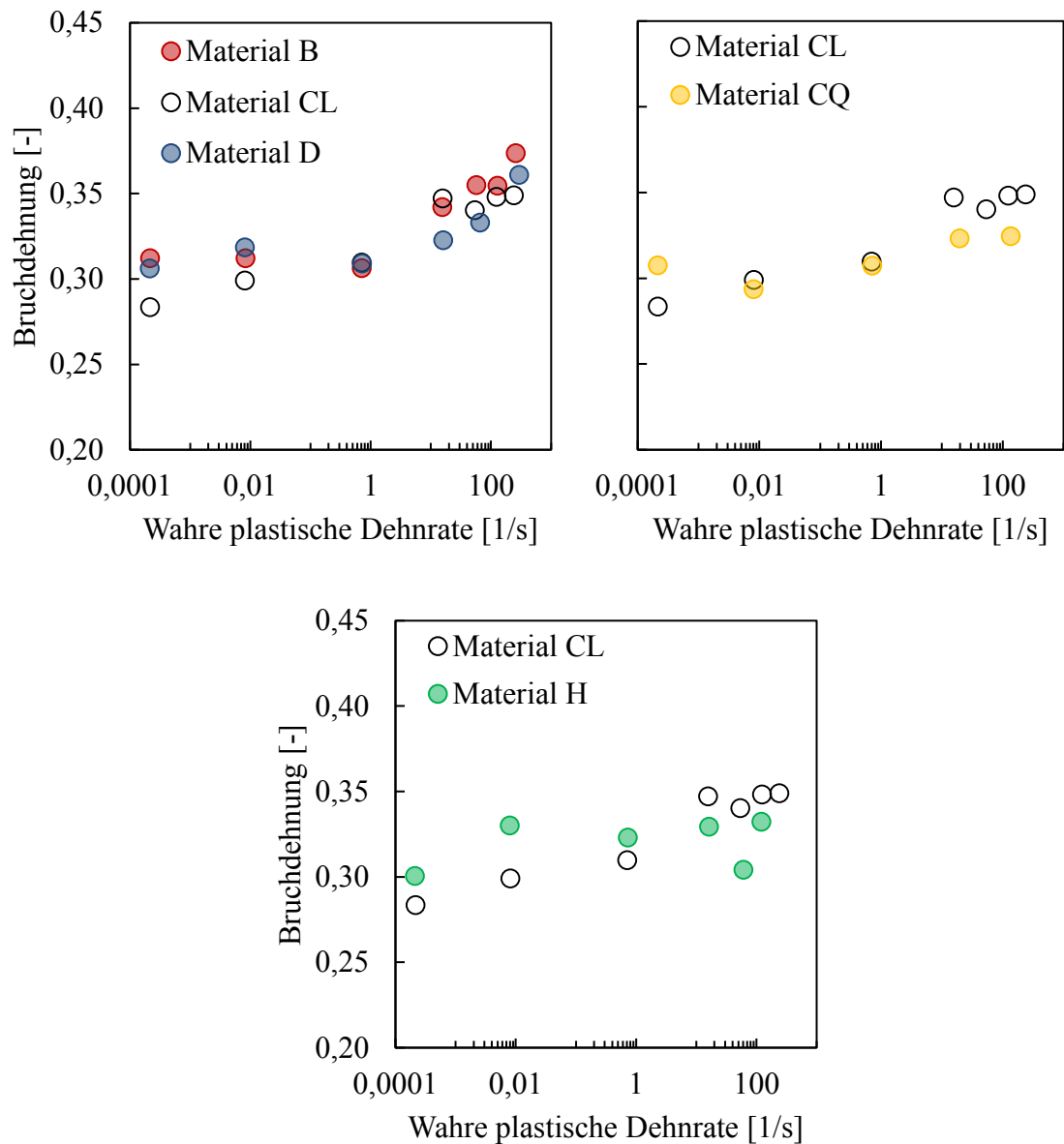


Abbildung 26: Entwicklung der Bruchdehnung über die wahre plastische Dehnrade. Darstellung von arithmetischen Mittelwerten. Links: Material B, CL und D. Rechts: Material CL und CQ. Mitte: Material CL und H.

4.2 Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit

In dem vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, dass die Festigkeits- und Verformungskennwerte der untersuchten Baustähle durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst werden. Dabei hat sich herausgestellt, dass die untere Streckgrenze von den untersuchten Parametern am deutlichsten auf die Veränderung der Dehnratenempfindlichkeit reagiert. Die Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit soll daher in dieser Arbeit anhand der unteren Streckgrenze der Baustähle untersucht werden. Die in Abschnitt 2.2 dargestellten Werkstoffeigenschaften, bei denen eine beeinflussende Wirkung auf die Dehnratenempfindlichkeit vermutet wird, sollen in den folgenden Abschnitten untersucht werden. Hierzu gehören als charakteristische Werkstoffkennwerte die untere Streckgrenze und das Streckgrenzenverhältnis sowie der mittlere Ferritkorndurchmesser, der als maßgebende Gefügekenngroße angesehen wird. Die Kerbschlagarbeit wird als integraler materialspezifischer Kennwert angesehen, der für eine Vielzahl materialspezifischer Eigenschaften steht, die wiederum als beeinflussende Parameter gelten.

Die Dehnratenempfindlichkeiten wurden entsprechend der in Abschnitt 2.2.1 dargestellten Vorgehensweise nach Gleichung (2.7) bestimmt. Entsprechend der Auswertung der Versuchsdaten in Abschnitt 4.1 wurden die untersuchten Dehnraten in zwei charakteristische Bereiche, Dehnratenbereich I und II, aufgeteilt.

Abbildung 27 zeigt beispielhaft für Material CL die Bestimmung der Dehnratenempfindlichkeiten m_e in den Dehnratenbereichen I und II. Die Dehnratenempfindlichkeit m_e entspricht der Steigung der Kurvenabschnitte bei Darstellung der logarithmierten wahren Spannung über der logarithmierten wahren plastischen Dehnraten. Es wird deutlich, dass die Dehnratenempfindlichkeit m_e als nicht konstant über den gesamten untersuchten Dehnratenbereich angenommen werden kann und ein Steigungswechsel im Übergangsbereich zwischen Dehnratenbereich I und II stattfindet.

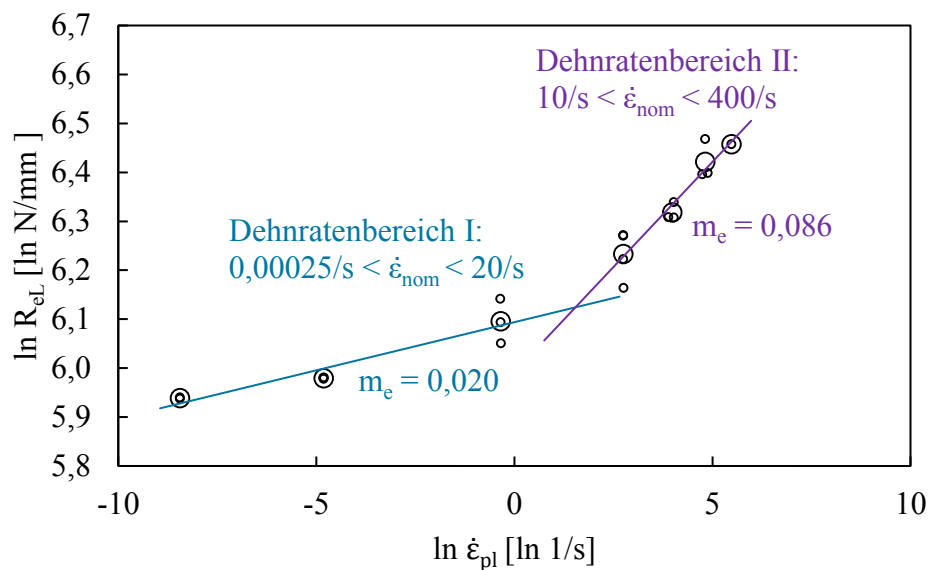


Abbildung 27: Bestimmung der Dehnratenempfindlichkeiten m_e für die Dehnratenbereiche I und II. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

In Abbildung 28 sind die für beide Dehnratenbereiche und alle untersuchten Baustähle ermittelten Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e dargestellt.

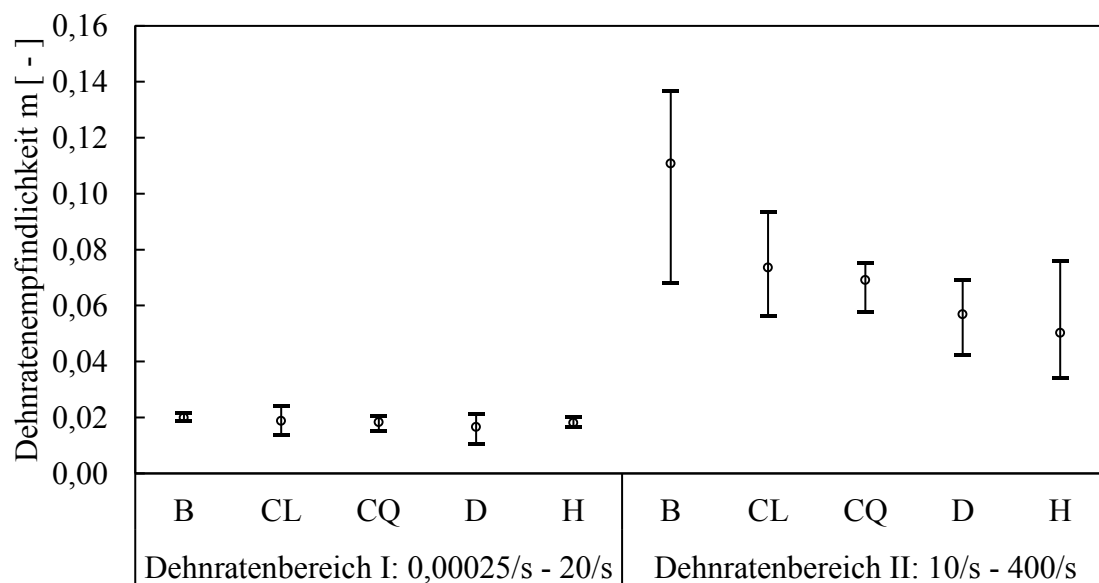


Abbildung 28: Darstellung der Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e für die Dehnratenbereiche I und II.

Es ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den untersuchten Materialien in Dehnratenbereich I vernachlässigbar klein sind und kaum über die Streuung der Einzelwerte hinausgehen. Die Dehnratenempfindlichkeiten steigen mit zunehmender Dehnratenrate von Dehnratenbereich I zu II an. Auffällig ist auch, dass die Streuung der Dehnratenempfindlichkeiten in Dehnratenbereich II deutlich gegenüber Dehnratenbereich I zunimmt. Zudem sind nun deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Baustählen zu erkennen.

Auf die Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit m_e durch die in Abschnitt 2.2 dargestellten Werkstoffeigenschaften soll in den folgenden Abschnitten eingegangen werden. Mit Ausnahme des mittleren Ferritkorndurchmessers ist den untersuchten Werkstoffeigenschaften gemein, dass sie üblicherweise im Rahmen eines Abnahmeprüfzeugnisses vorliegen. Dies ermöglicht eine Einschätzung der Dehnratenempfindlichkeit eines Baustahls noch vor Werkstoffbestellung.

4.2.1 Quasistatische Streckgrenze und mittlerer Ferritkorndurchmesser

Nach Abschnitt 2.2.3 befindet die Literatur mehrheitlich, dass der Effekt der Korngrößenverfestigung, d. h. die Vergrößerung der Fließspannung in Abhängigkeit des mittleren Korndurchmessers, nicht durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst wird (vgl. Larour [12]). Weiterhin wird hinsichtlich der Dehnratenempfindlichkeit mehrheitlich befunden, dass diese wenig durch die Korngröße beeinflusst wird (vgl. Tsuchida [38]). Dagegen wird nach derzeitigem Kenntnisstand überstimmend befunden, dass die anfängliche Festigkeit, das heißt die bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelte Streckgrenze, einen signifikanten Einfluss auf die Dehnratenempfindlichkeit eines Materials hat. In der Literatur wurde die Beeinflussung der quasistatischen Streckgrenze durch den mittleren Korndurchmesser vielfach untersucht und die Beschreibbarkeit mithilfe der Hall-Petch-Beziehung bestätigt (siehe Abschnitt 2.2.3).

Es ist somit zu vermuten, dass die Dehnratenempfindlichkeit indirekt durch den mittleren Korndurchmesser beeinflusst wird. Eine isolierte Untersuchung der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch die quasistatische Streckgrenze und den mittleren Korndurchmesser erscheint somit für die in dieser Arbeit untersuchten Stähle nicht zweckmäßig.

Streckgrenze bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit

Abbildung 29 zeigt die Dehnratenempfindlichkeit m_e in Abhängigkeit der quasistatischen unteren Streckgrenze $R_{eL,qs}$ dargestellt für Dehnratenbereich I (links) und II (rechts). Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind lediglich Mittelwerte abgebildet. Die im Folgenden dargestellten Effekte treffen auf beide Dehnratenbereiche zu, sollen jedoch aus Gründen der besseren Erkennbarkeit lediglich anhand von Dehnratenbereich II diskutiert werden.

Nach Stark-Seuken [21] ist mit zunehmender quasistatischer Streckgrenze mit einer abnehmenden Dehnratenempfindlichkeit m_e zu rechnen. Für die drei untersuchten Chargen S355J2+N kann dieser Befund bestätigt werden. Die Dehnratenempfindlichkeit nimmt von Material B zu Material CL besonders deutlich ab. Die relative Differenz bezogen auf Material CL beträgt 71,5 %. Die Differenz zwischen Material CL und Material D ist mit deutlich 28,5 % geringer.

Im Vergleich der Längs- und Querrichtung von Material CL zeigen sich wie auch bei der quasistatischen unteren Streckgrenze $R_{eL,qs}$ leichte Unterschiede hinsichtlich der Dehnratenempfindlichkeiten m_e . Die relative Differenz bezogen auf Material CL ist jedoch mit 4,9 % gering.

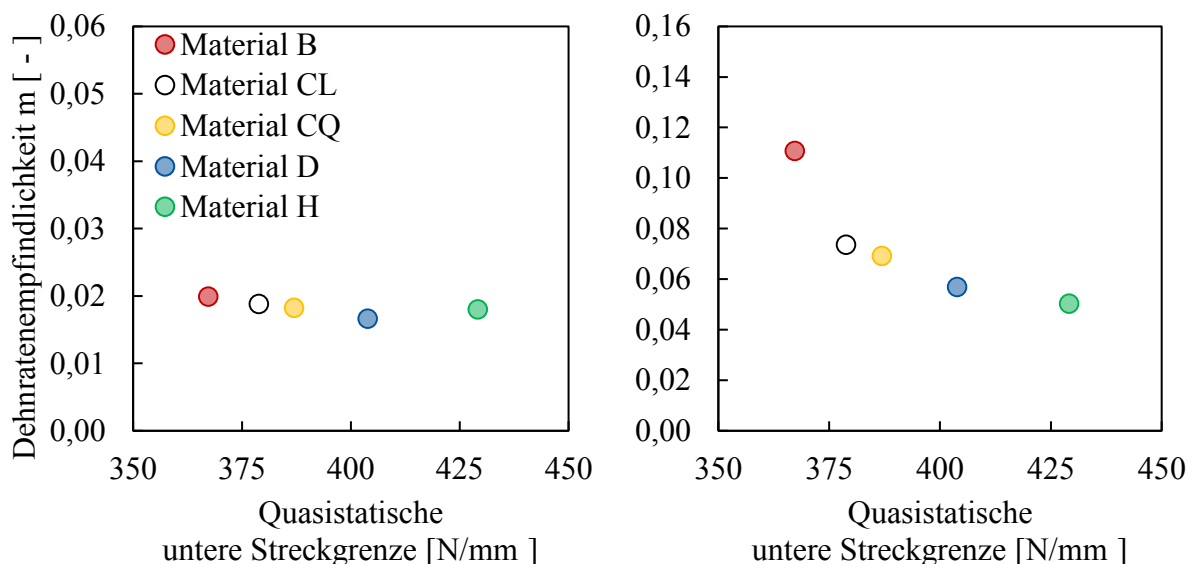


Abbildung 29: Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e in Abhängigkeit der quasistatischen unteren Streckgrenze. Links: Dehnratenbereich I. Rechts: Dehnratenbereich II.

Die zuvor beschriebene Abhängigkeit zwischen $R_{eL,qs}$ und m_e lässt sich ohne weiteres auf Material H übertragen. So weist Material H von allen untersuchten Baustählen die niedrigste Dehnratenempfindlichkeit m_e sowie die höchste quasistatische untere Streckgrenze $R_{eL,qs}$ auf.

Mittlerer Ferritkorndurchmesser

Es wird davon ausgegangen, dass die in Abbildung 29 gezeigte Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit über die quasistatische untere Streckgrenze $R_{eL,qs}$ auf die Darstellung über den mittleren Ferritkorndurchmesser d übertragbar ist. In Abbildung 30 sind die Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e in Abhängigkeit der Mittelwerte des mittleren Ferritkorndurchmessers d für beide Dehnratenbereiche dargestellt. Für die drei untersuchten Chargen S355J2+N nimmt die Dehnratenempfindlichkeit m_e mit zunehmender Korngröße zu.

Dies entspricht dem Gedanken der Hall-Petch-Beziehung (siehe Abschnitt 2.2.3), nach dem die Streckgrenze mit zunehmender Korngröße abnimmt sowie dem Befund nach Krabiell [9], Kühn [10] und Stark-Seuken [21], nach dem die Dehnratenempfindlichkeit m_e mit abnehmender Streckgrenze signifikant ansteigt.

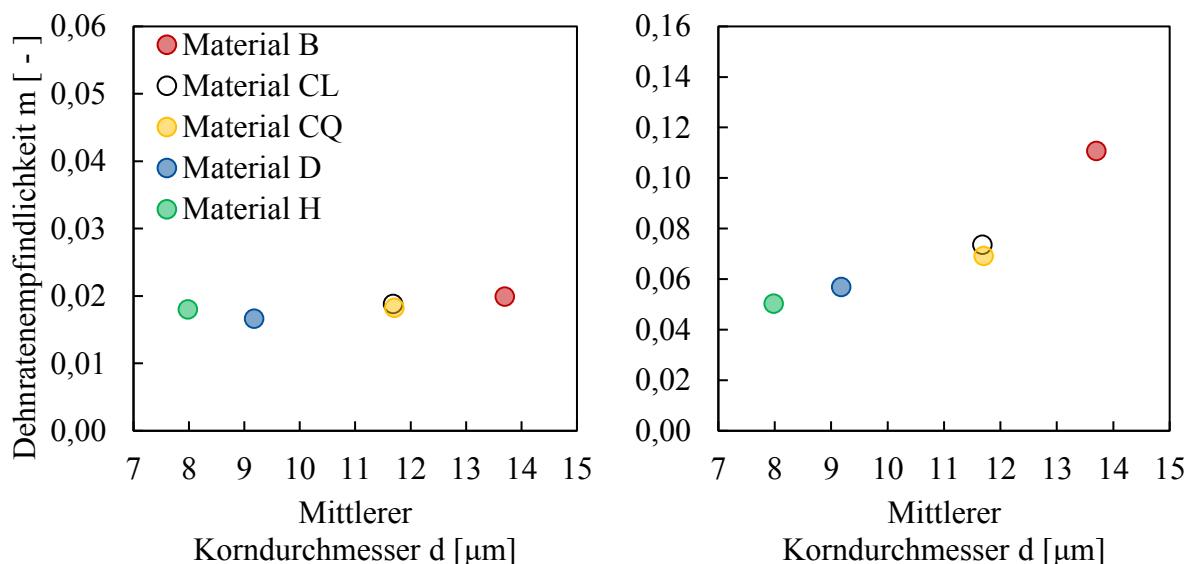


Abbildung 30: Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e in Abhängigkeit des mittleren Ferritkorndurchmessers. Links: Dehnratenbereich I. Rechts: Dehnratenbereich II.

Allgemein

Es wird vermutet, dass für die in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellten Beziehungen weder allein die quasistatische untere Streckgrenze, noch allein die Korngröße als Alleinmechanismen verantwortlich sind. Die in dieser Arbeit ermittelten Werte der Dehnratenempfindlichkeit m_e für die normalisierten Baustähle, Materialien B, CL, CQ und D, lassen sich in Abhängigkeit des mittleren Korndurchmessers darstellen. Die Darstellung über die quasistatische untere Streckgrenze ergibt einen der Hall-Petch-Beziehung entsprechenden Verlauf. Dies lässt darauf schließen, dass weitere beeinflussende Parameter der quasistatischen unteren Streckgrenze $R_{eL,qs}$, wie bspw. der Anteil bestimmter Legierungselemente, keinen wesentlichen Einfluss auf die Dehnratenempfindlichkeit des Werkstoffs ausüben und diese maßgeblich durch die Korngröße gesteuert wird.

Korngrenzenwiderstand

Nach Hall [35] und Petch [36] kann der Verlauf der Fließspannung σ_f als lineare Funktion des reziproken Wertes der Wurzel aus dem mittleren Korndurchmesser d dargestellt werden. Nach u. a. Rees [8], Weber [34] und Larour [12] ist die Steigung der Petch-Geraden für ferritische Stähle nahezu unabhängig von der Dehnraten.

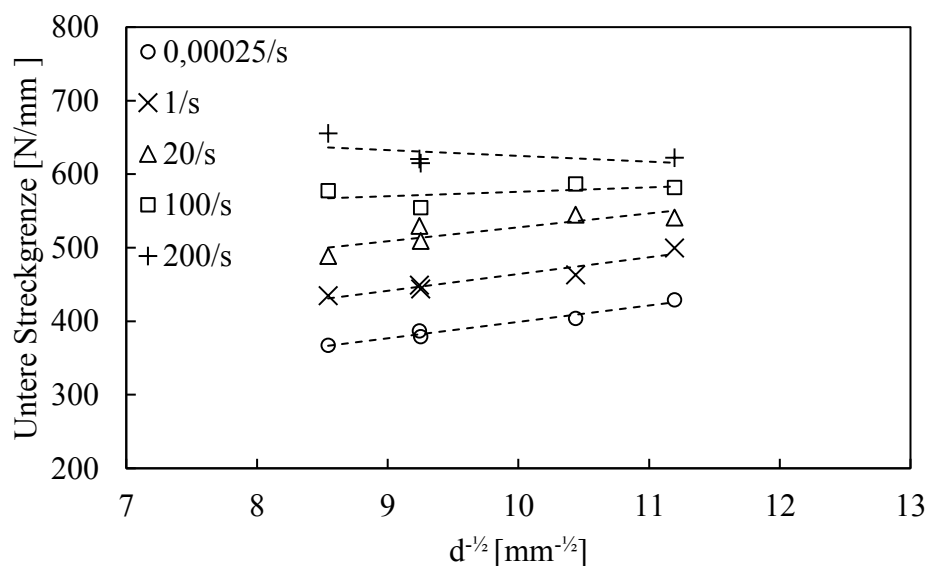


Abbildung 31: Entwicklung der unteren Streckgrenze in Abhängigkeit von $d^{-1/2}$ für verschiedene nominelle Dehnraten. Darstellung von Mittelwerten.

In Abbildung 31 sind die Petch-Geraden für die in dieser Arbeit untersuchten Baustähle von quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit bis zu einer nominellen Dehnrates $\dot{\epsilon}_{\text{nom}} = 200/\text{s}$ dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Startspannung σ_0 bei Erhöhung der Dehnrates zunimmt. Die Steigung der Petch-Geraden zeigt sich gegenüber der Veränderung der Beanspruchungsgeschwindigkeit zunächst als wenig beeinflussbar. Erst bei Dehnrates $\dot{\epsilon}_{\text{nom}} \geq 100/\text{s}$ ist ein zunehmend flacherer Verlauf der Geraden erkennbar.

Der Korngrenzenwiderstand kann für Dehnrates $\dot{\epsilon}_{\text{nom}} < 100/\text{s}$ somit als nahezu unabhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit befunden werden. Bei höheren Beanspruchungsgeschwindigkeiten ist zunehmend die in Abschnitt 4.1.1 dargestellte höhere Dehnratenempfindlichkeit für Baustähle mit niedriger quasistatischer Streckgrenze und entsprechend größeren mittleren Ferritkorndurchmessern insbesondere in Dehnratenbereich II zu beobachten (siehe Abbildung 12 links).

4.2.2 Kerbschlagarbeit

Die Kerbschlagarbeit wird in dieser Arbeit als integraler materialspezifischer Kennwert gesehen, der für eine Vielzahl materialspezifischer Eigenschaften steht, die als beeinflussende Parameter der Dehnratenempfindlichkeit gelten. Es wird vermutet, dass eine Korrelation zwischen der Dehnratenempfindlichkeit und der Kerbschlagzähigkeit des Baustahls besteht. Dabei wird davon ausgegangen, dass keine gegenseitige Beeinflussung stattfindet. Vielmehr wird vermutet, dass beide Eigenschaften durch dieselben Parameter beeinflusst werden und sich die Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit der untersuchten Baustähle in Abhängigkeit der jeweiligen Kerbschlagarbeit darstellen lässt.

Abbildung 32 zeigt die Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e in Abhängigkeit der Kerbschlagarbeit KV(-20°C). Für die drei untersuchten normalisierten Baustähle, Materialien B, CL und D, nimmt die Dehnratenempfindlichkeit m_e mit Zunahme der Kerbschlagarbeit KV(-20°C) ab. Die Entwicklung entspricht dem Verlauf der Dehnratenempfindlichkeit bei Darstellung über die quasistatische untere Streckgrenze (siehe Abbildung 29) bzw. über mittleren Ferritkorndurchmesser (siehe Abbildung 30). Entsprechend der Korngrenzenverfestigung erhöht sich mit zunehmend feinerem Korn die Anzahl der Korngrenzen, die als Hindernisse der Versetzungsbewegungen angesehen werden können (siehe Abschnitt 2.2.3). Dies führt gleichermaßen zu einem Anstieg der Festigkeit und der Zähigkeit, bzw. zu einer Zunahme der Kerbschlagarbeit. Die Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit über die Kerbschlagarbeit lässt sich somit in

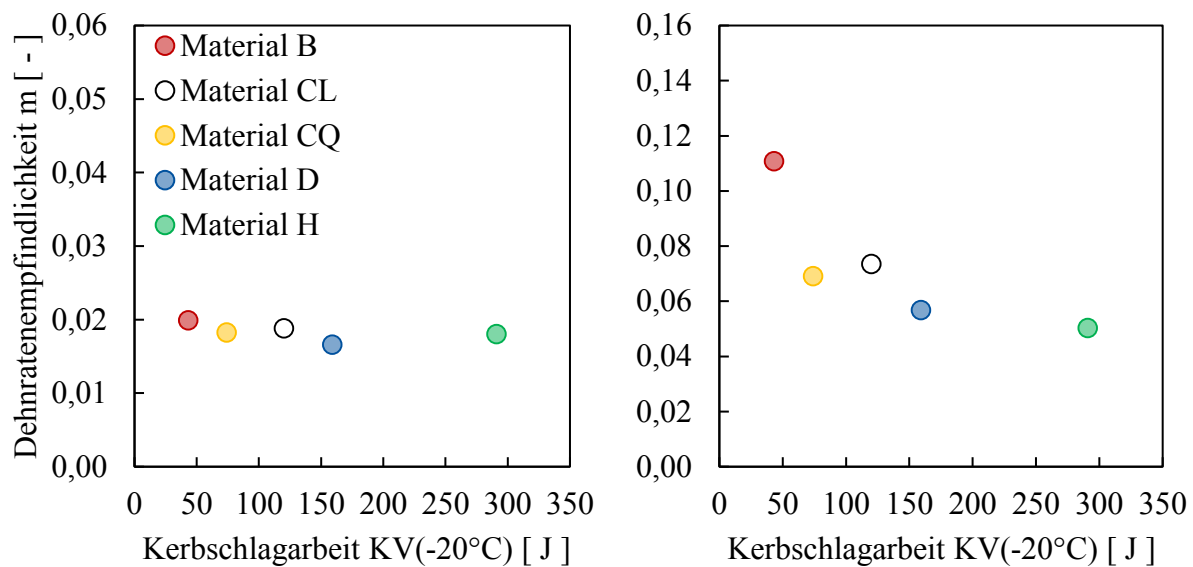


Abbildung 32: Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e in Abhängigkeit der Kerbschlagarbeit $KV(-20^\circ C)$. Links: Dehnratenbereich I. Rechts: Dehnratenbereich II.

Übereinstimmung mit der Darstellung über der quasistatischen unteren Streckgrenze und des mittleren Ferritkorndurchmessers metallphysikalisch erklären.

Im Vergleich von Material CL zu CQ ist beachtenswert, dass die in Querrichtung gemessenen Kerbschlagarbeiten $KV(-20^\circ C)$ im Mittel 38 % niedriger sind, als in Längsrichtung. Trotz der niedrigeren Arbeitswerte weist Material CQ jedoch eine niedrigere Dehnratenempfindlichkeit auf als Material CL. Dies kann zum einen auf die in Querrichtung ermittelten höheren Festigkeitswerte zurückgeführt werden. Zum anderen soll auf die im Kerbschlagbiegeversuch teilweise übliche Streuung der ermittelten Arbeitswerte verwiesen werden (siehe Abschnitt 3.2.2). Insbesondere Material CL fiel dabei durch stark streuende Arbeitswerte auf (siehe Abbildung 5).

Allgemein

Material H weist infolge des thermomechanischen Herstellverfahrens von allen untersuchten Baustählen die größte Kerbschlagzähigkeit und dementsprechend die niedrigste Dehnratenempfindlichkeit auf. Bei Betrachtung der drei normalisierten Baustähle bei Probenentnahme längs zur Walzrichtung, Materialien B, CL und D, lässt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Kerbschlagarbeit und

Dehnratenempfindlichkeit erkennen. Bei Hinzunahme von Material H fällt auf, dass eine wesentlich flachere Entwicklung für Kerbschlagarbeiten $> 150 \text{ J}$ vorliegen muss, bzw. dass die Dehnratenempfindlichkeit für große Arbeitswerte gegen einen unteren Grenzwert konvergiert.

4.2.3 Streckgrenzenverhältnis

Wie in Abschnitt 4.1.2 gezeigt, verändern sich die bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelten Werte bei einer Dehnratenzunahme entsprechend der unterschiedlichen Dehnratenempfindlichkeiten von Streckgrenze und Zugfestigkeit (siehe Abbildung 17). Die Differenz zwischen beiden Werten nimmt mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit ab, während das Streckgrenzenverhältnis R_{eL} / R_m ansteigt. Abbildung 33 zeigt die Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e in Abhängigkeit der bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelten Streckgrenzenverhältnisse R_{eL} / R_m . In Dehnratenbereich I sind lediglich geringe Unterschiede zwischen den Materialien auszumachen. Tendenziell kann ein mit ansteigendem Streckgrenzenverhältnis abfallender Verlauf der Dehnratenempfindlichkeit ausgemacht werden.

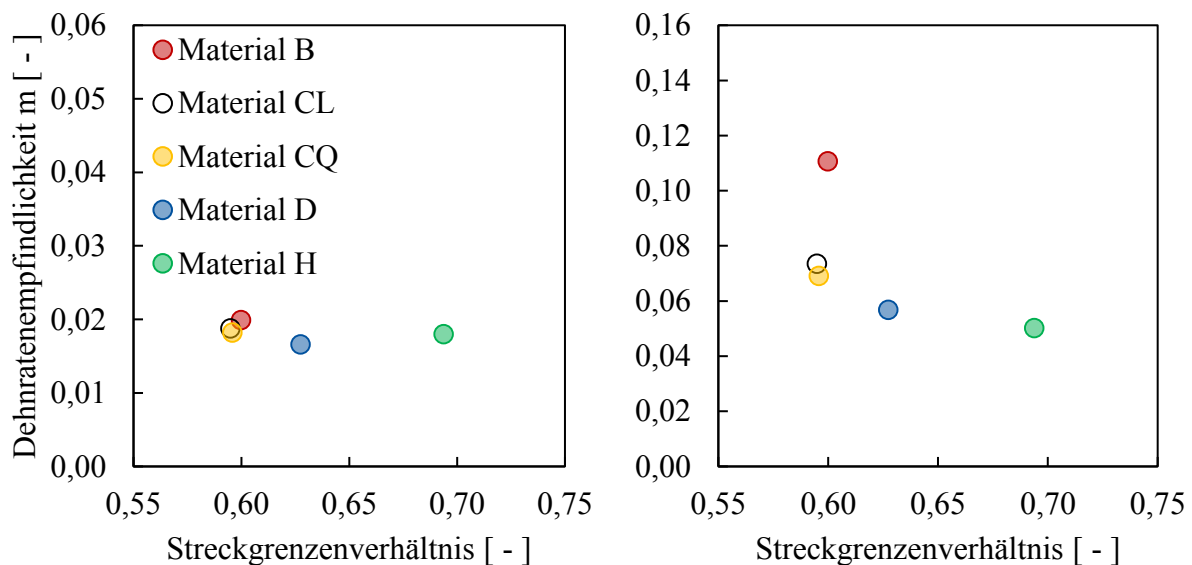


Abbildung 33: Mittelwerte der Dehnratenempfindlichkeiten m_e in Abhängigkeit vom Streckgrenzenverhältnis. Links: Dehnratenbereich I. Rechts: Dehnratenbereich II.

Bei Betrachtung von Dehnratenbereich II zeigt sich, dass der Verlauf der Dehnratenempfindlichkeit m_e über das Streckgrenzenverhältnis keiner logischen Entwicklung folgt. So weist Material B trotz geringer Unterschiede der Streckgrenzenverhältnisse eine deutlich größere Dehnratenempfindlichkeit auf, als die Materialien CL und CQ. In Verbindung mit den Materialien D und H ergibt sich somit ein stark überproportionaler Anstieg der Dehnratenempfindlichkeit mit Abnahme des Streckgrenzenverhältnisses.

Die Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit über das Streckgrenzenverhältnis sollte im Zusammenhang mit der Darstellung über die Kerbschlagarbeit (siehe Abbildung 32) beurteilt werden. Die Kerbschlagarbeit kann als Maß für die Zähigkeit gesehen werden, die den Widerstand des Werkstoffs gegen Bruch bzw. gegen Rissausbreitung beschreibt. Das Streckgrenzenverhältnis dagegen steht als Maß für das plastische Verformungsvermögen des Werkstoffs bis zum Eintritt des Bruchs. Wie die Kerbschlagarbeit kann auch das Streckgrenzenverhältnis als Anhaltspunkt für die Verformbarkeit, bzw. die Zähigkeit eines Werkstoffs gesehen werden. Während jedoch ein niedriger Wert des Streckgrenzenverhältnisses üblicherweise mit einer guten Verformbarkeit und großen Zähigkeit assoziiert wird, steht ein niedriger Arbeitswert für eine geringe Zähigkeit. Da die Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit bei einer Zunahme der Kerbschlagarbeit einen abfallenden Verlauf aufweist, sollte sich bei einer Zunahme des Streckgrenzenverhältnisses ein ansteigender Verlauf der Dehnratenempfindlichkeit einstellen. Dies kann anhand der in dieser Arbeit ermittelten Versuchsdaten nicht beobachtet werden.

Es ist zu vermuten, dass eine Darstellung der Dehnratenempfindlichkeit allein über das Streckgrenzenverhältnis als Maß für die Zähigkeit nicht zwingend sinnvoll gedeutet werden kann. Auch in der Arbeit von Dahl & Krabiell [61] wird befunden, dass das Streckgrenzenverhältnis ohne die Berücksichtigung des Herstellverfahrens und des Werkstoffgefüges nicht als Maß für die Beurteilung der Zähigkeit eines Werkstoffs geeignet ist.

4.2.4 Ingenieurmodell

Als einfaches Hilfsmittel zur Bestimmung der unteren Streckgrenze bei einer beliebigen wahren plastischen Dehnraten und in Abhängigkeit der in Abschnitt 4.2 untersuchten Werkstoffkennwerte soll nun ein Ingenieurmodell vorgestellt werden. Hinsichtlich der

untersuchten Werkstoffkennwerte erscheinen dabei die im Rahmen eines üblicherweise vorhandenen Abnahmeprüfzeugnisses gegebenen Werte der quasistatischen Streckgrenze und Kerbschlagarbeit als besonders hilfreich. Auf diese Weise kann eine grobe Einschätzung der zu erwartenden dehnratenabhängigen Veränderung der unteren Streckgrenze auch ohne die Durchführung von experimentellen Untersuchungen erfolgen.

Die Beschreibung der dehnratenabhängigen Spannungszunahme in Abhängigkeit von quasistatischer unterer Streckgrenze $R_{eL,qs}$ und Kerbschlagarbeit KV(-20°C) soll auf Grundlage der in den vorgehenden Abschnitten ermittelten Dehnratenempfindlichkeiten m_e und somit für die Dehnratenbereiche I und II getrennt erfolgen (siehe Abbildung 27).

Die Dehnratenempfindlichkeit m_e kann in Dehnratenbereich I und für alle untersuchten Baustähle als nahezu konstant zu $m_{e,I} = 0,02$ angenommen werden (siehe Abbildung 28). Aus der Definition der Dehnratenempfindlichkeit m_e nach Gleichung (2.7) lässt sich die untere Streckgrenze $R_{eL,\dot{\epsilon}_{pl,2}}$ für eine beliebige wahre plastische Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl,2} > \dot{\epsilon}_{pl,1}$ in Dehnratenbereich I wie folgt bestimmen:

$$R_{eL,\dot{\epsilon}_{pl,2}} = R_{eL,\dot{\epsilon}_{pl,1}} \cdot e^{m_{e,I} \cdot \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl,2}}{\dot{\epsilon}_{pl,1}}\right)} \quad (4.3)$$

Tabelle 7 zeigt beispielhaft für eine Auswahl üblicher Stahlgüten die Erhöhung der unteren Streckgrenze in Abhängigkeit der betrachteten wahren plastischen Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl,2}$. Ausgangspunkt ist hierbei die wahre plastische Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl,1} = 0,00025/s$ und die zugehörige quasistatische untere Streckgrenze $R_{eL,\dot{\epsilon}_{pl,1}}$.

Tabelle 7: Erhöhung der unteren Streckgrenze R_{eL} in Abhängigkeit der Stahlgüte in Dehnratenbereich I.

$\dot{\epsilon}_{pl,2}$ [1/s]	$\ln \dot{\epsilon}_{pl,2} / \dot{\epsilon}_{pl,1}$ [-]	Untere Streckgrenze [N/mm]			
		S235	S355	S420	S460
0,00025	0,000	235	355	420	460
0,001	1,386	242	365	432	473
0,01	3,689	253	382	452	495
0,1	5,991	265	400	473	519
1	8,294	277	419	496	543
20	11,290	295	445	526	577

In den vorhergehenden Abschnitten wurde gezeigt, dass die untersuchten Baustähle in Dehnratenbereich II deutlich unterschiedliche Dehnratenempfindlichkeiten m_e aufweisen. Für die dehnratenabhängige Bestimmung der unteren Streckgrenze in Dehnratenbereich II ist somit zunächst die Dehnratenempfindlichkeit $m_{e,II}$ in Abhängigkeit der quasistatischen unteren Streckgrenze $R_{eL,qs}$ oder der Kerbschlagarbeit $KV(-20^\circ C)$ zu bestimmen. Die Zusammenhänge zwischen der Dehnratenempfindlichkeit $m_{e,II}$ und den beiden Werkstoffkennwerten lassen sich dabei durch eine Potenzfunktion in guter Näherung beschreiben:

$$m_{e,II}(R_{eL,qs}) = m_a + m_b \cdot (R_{eL,qs})^{m_c} \quad (4.4)$$

$$m_{e,II}(KV(-20^\circ C)) = m_a + m_b \cdot (KV(-20^\circ C))^{m_c} \quad (4.5)$$

Abbildung 34 zeigt die Verläufe der Potenzfunktionen im Vergleich zu den ermittelten Dehnratenempfindlichkeiten $m_{e,II}$. Die ermittelten Parametersätze sind im Anhang A.1 gegeben.

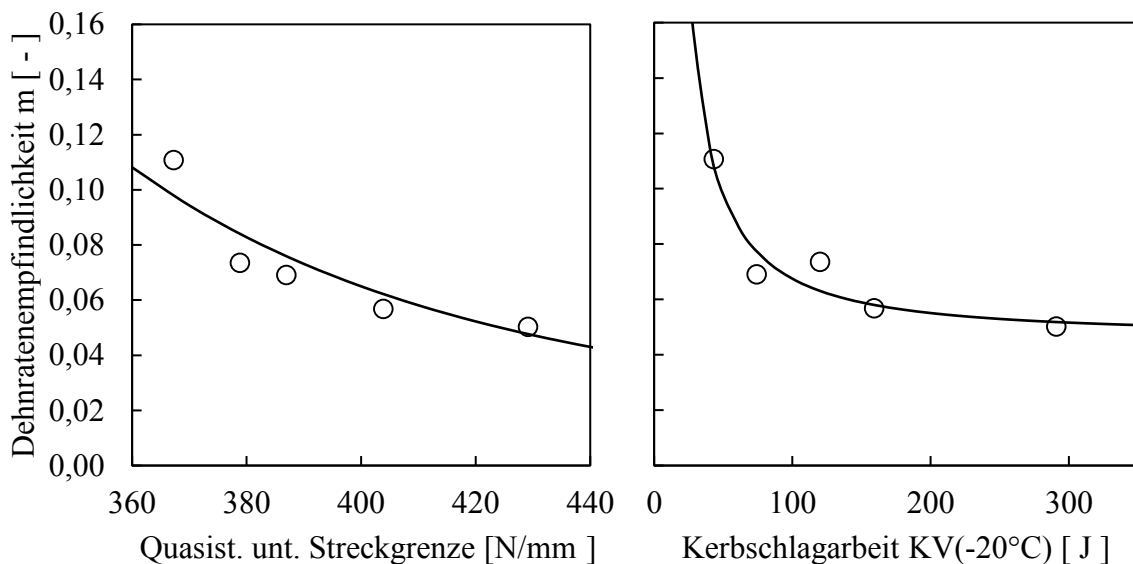


Abbildung 34: Approximation der Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit $m_{e,II}$ in Dehnratenbereich II mithilfe von Potenzfunktionen. Links: Quasistatische untere Streckgrenze $R_{eL,qs}$. Rechts: Kerbschlagarbeit $KV(-20^\circ C)$.

Für die dehnratenabhängige Bestimmung der unteren Streckgrenze in Dehnratenbereich II ist zunächst die untere Streckgrenze $R_{eL,I-II}$ im Übergangsbereich zwischen in Dehnratenbereich I und II zu bestimmen. Für die wahre plastische Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl,1} = 0,00025/s$ und die zugehörige quasistatische untere Streckgrenze $R_{eL,\dot{\epsilon}_{pl,1}} = R_{eL,qs}$ kann diese vereinfacht wie folgt bestimmt werden:

$$R_{eL,I-II}(\dot{\epsilon}_{pl} = 20/s) = R_{eL,qs} \cdot e^{0,02 \cdot \ln\left(\frac{20/s}{0,00025/s}\right)} \cong R_{eL,qs} \cdot 1,253. \quad (4.6)$$

Unter Verwendung der Dehnratenempfindlichkeit $m_{e,II}$ lässt sich die untere Streckgrenze $R_{eL,\dot{\epsilon}_{pl,2}}$ somit für eine beliebige wahre plastische Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl,2} > 20/s$ wie folgt bestimmen:

$$R_{eL,\dot{\epsilon}_{pl,2}} = (R_{eL,qs} \cdot 1,253) \cdot e^{m_{e,II} \cdot \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl,2}}{20/s}\right)}. \quad (4.7)$$

Abbildung 35 zeigt beispielhaft für eine Auswahl üblicher Stahlgüten und Arbeitswerte KV(-20°C) die jeweiligen Entwicklungen der unteren Streckgrenze in Abhängigkeit der betrachteten wahren plastischen Dehnrates $\dot{\epsilon}_{pl,2}$. Den abgebildeten Stahlgüten wurden die in Tabelle 7 bei einer wahren plastischen Dehnrates von $\dot{\epsilon}_{pl} = 0,00025/s$ angegebenen Werte als quasistatische untere Streckgrenzen $R_{eL,qs}$ zugewiesen. Für den direkten Vergleich mit den ermittelten Versuchsdaten sind hier beispielhaft für Material CL die im Versuch ermittelten Einzelwerte der unteren Streckgrenze R_{eL} rot dargestellt.

Das Ingenieurmodell beschreibt die Entwicklung der unteren Streckgrenze in Dehnratenbereich I in guter Näherung allein in Abhängigkeit der quasistatischen unteren Streckgrenze $R_{eL,qs}$ und somit unabhängig vom Herstellungsverfahren, von der Kerbschlagarbeit und der Korngröße des Baustahls. In Dehnratenbereich II unterschätzt das Ingenieurmodell die im Versuch ermittelten Werte, sowohl für die Bestimmung der unteren Streckgrenze anhand der quasistatischen unteren Streckgrenze nach Gleichung (4.4), als auch anhand der Kerbschlagarbeit nach Gleichung (4.5). Dies ist auf die Definition der Dehnratenempfindlichkeit m_e zurückzuführen, die lediglich die gemittelte Steigung der Entwicklung der unteren Streckgrenze über die wahre plastische Dehnrates für den jeweils betrachteten Dehnratenbereich wiedergibt. Dies führt in Teilbereichen zu einer Über-/ Unterschätzung der tatsächlichen Dehnratenempfindlichkeit. Die Berechnung der unteren Streckgrenze in Dehnratenbereich II erfolgt auf Grundlage der im

Übergangsbereich ermittelten unteren Streckgrenze $R_{eL,I-II}$. Eine in Dehnratenbereich I auftretende Differenz zwischen Mess- und Modellwert hat somit Auswirkung auf die Berechnungsgenauigkeit der unteren Streckgrenze in Dehnratenbereich II. Dies führt dazu, dass die Genauigkeit des Ingenieurmodells mit wachsendem Abstand zwischen den wahren plastischen Dehnraten $\dot{\epsilon}_{pl,1}$ und $\dot{\epsilon}_{pl,2}$ abnimmt.

Es wird deutlich, dass die in dieser Arbeit ermittelten Dehnratenempfindlichkeiten m_e nicht ohne weitere Untersuchungen auf Baustähle niedrigerer Festigkeit und entsprechender höherer Dehnratenempfindlichkeit extrapoliert werden können. Die für den Baustahl S235 nach Gleichung (4.4) ermittelte Dehnratenempfindlichkeit m_e sowie die resultierenden Werte der unteren Streckgrenze in Dehnratenbereich II (siehe Abbildung 35, links) werden deutlich überschätzt.

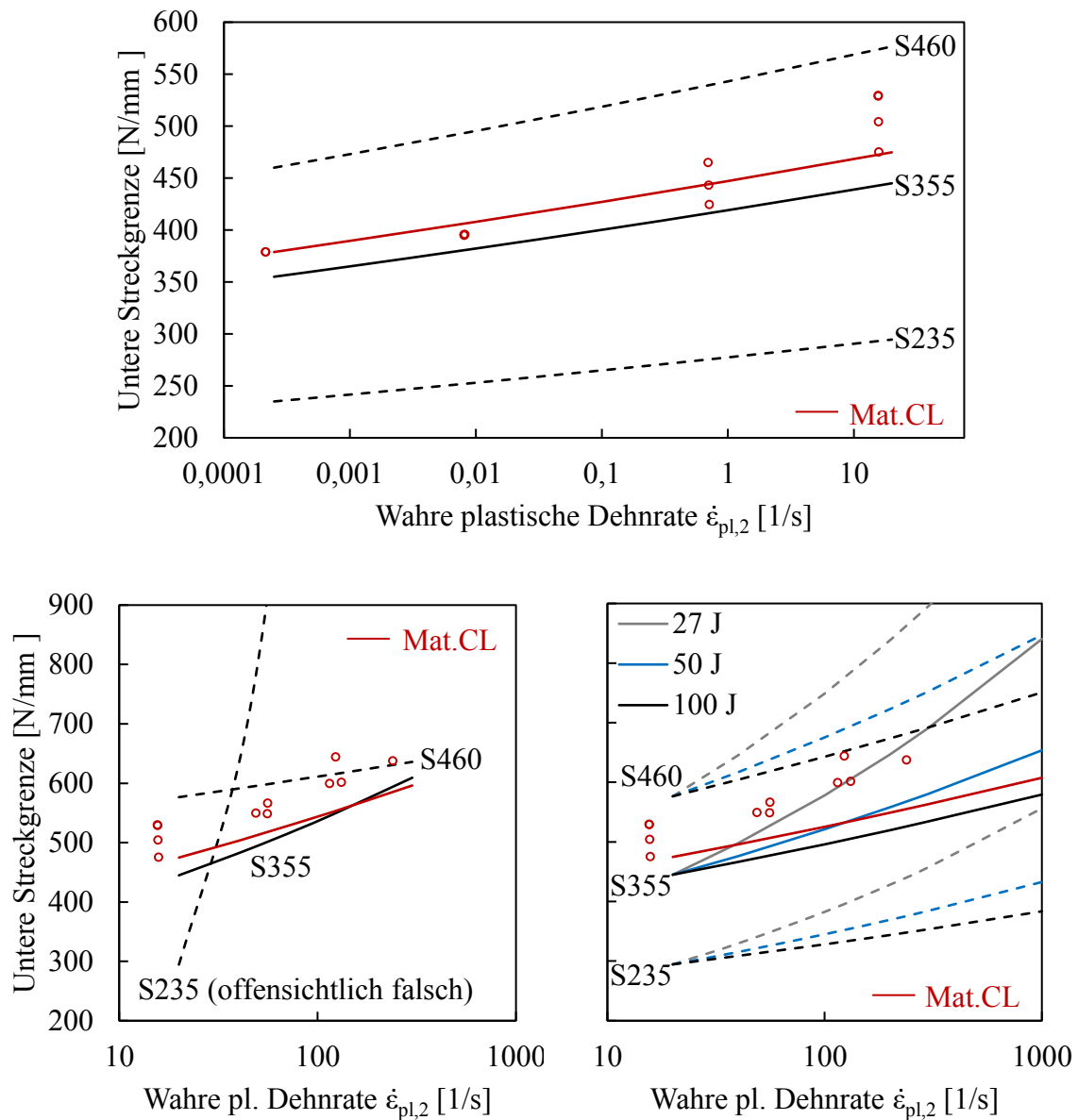


Abbildung 35: Erhöhung der unteren Streckgrenze R_{eL} in Dehnratenbereich I (oben) und II (unten) in Abhängigkeit der quasistatischen unteren Streckgrenze $R_{eL,qs}$ (links) und der Kerbschlagarbeit KV(-20°C) (rechts).

4.3 Materialmodelle

In den vorigen Abschnitten wurde der Einfluss der Dehnrates auf die Fließkurve anhand verschiedener Baustähle untersucht. Anhand der unteren Streckgrenze wurde zudem die Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch einzelne Werkstoffeigenschaften betrachtet. Dabei haben sich sowohl die Festigkeits- als auch Verformungskennwerte der

Baustähle als teilweise signifikant geschwindigkeitssensitiv herausgestellt. Dies bedeutet, dass die Form der Fließkurve durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst wird.

Es soll nun ein für die untersuchten Baustähle geeignetes Materialmodell gefunden werden, welches die ermittelten Fließkurvenscharen abbilden kann. Dabei sollen zunächst die in Abschnitt 2.3 gezeigten bestehenden Modelle zur dehnratenabhängigen Beschreibung der Fließkurve verwendet werden. Im Anschluss soll ein neuer Ansatz gezeigt und mit den bestehenden Modellen hinsichtlich der Approximationsgüte verglichen werden.

4.3.1 Idealisierte Fließkurven

Um eine einheitliche Datengrundlage zu erzeugen, die eine konsistente Bewertung der Modelle zulässt, wurden die in den Versuchen ermittelten Fließkurven idealisiert. Hierzu wurden charakteristische Punkte auf der Fließkurve definiert und für alle Versuche bestimmt. In Tabelle 8 sind die entsprechenden Spannungs- und Dehnungswerte der Punkte eins bis sieben dargestellt. In Abbildung 36 sind die auf diese Weise ermittelten charakteristischen Punkte beispielhaft für Material B bei einer nominellen Dehnrate $\dot{\epsilon}_{\text{nom}} = 1/\text{s}$ abgebildet. Die Einzel- und Mittelwerte sind mit kleinen und großen Symbolen gekennzeichnet. Die einzelnen Fließkurven sind grau dargestellt, die Fließkurve der Mittelwerte ist schwarz dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Bestimmung der Fließkurve der Mittelwerte eine geeignete Methode darstellt, den charakteristischen Verlauf der Fließkurvenschar im Bereich der Verfestigung abzubilden. Weiterhin wird deutlich, dass die Einzel- und Mittelwerte der charakteristischen Punkte die Fließkurvenschar sowie Fließkurve der Mittelwerte im Wesentlichen gut abbilden können. Abbildung 37 zeigt beispielhaft für Material B die gruppenweise je nomineller Dehnrate bestimmten Einzel- und Mittelwerte der charakteristischen Punkte sowie die jeweiligen Fließkurven der Mittelwerte.

Tabelle 8: Definition der charakteristischen Punkte der idealisierten Fließkurven.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6	Punkt 7
$\epsilon_{w,pl}$	0 %	$A_{Lü}$	5 %	6 %	7 %	8 %	A_{GI}
σ_w	R_{eL}	R_{eL}	$R_{p5\%}$	$R_{p6\%}$	$R_{p7\%}$	$R_{p8\%}$	R_m

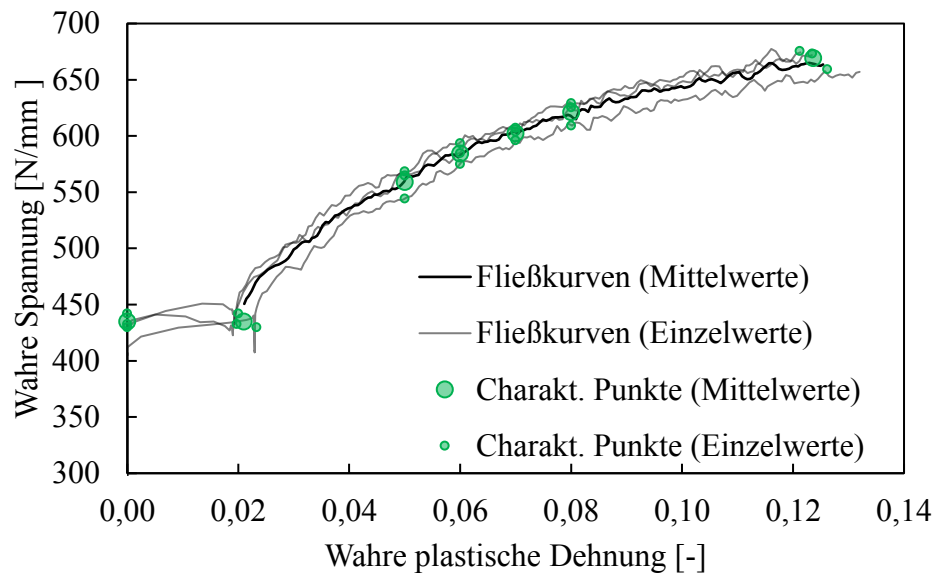


Abbildung 36: Ermittelte Fließkurven und charakteristische Punkte. Nominelle Dehnrage $\dot{\epsilon}_{\text{nom}} = 1/\text{s}$. Material B - S355J2+N.

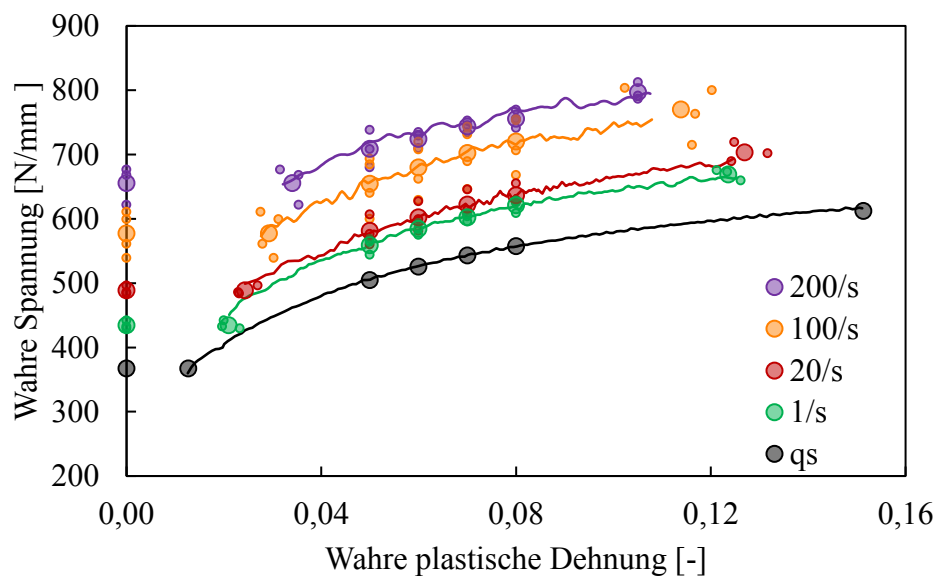


Abbildung 37: Fließkurven der Mittelwerte und Einzel- und Mittelwerte der charakteristischen Punkte. Material B - S355J2+N.

4.3.2 Bewertungsmaßstab

Zur Beurteilung der Approximationsgüte der einzelnen Materialmodelle wurden die Fehlerquadrate anhand der Einzelwerte der charakteristischen Punkte berechnet. Im Anschluss wurden die Bestimmtheitsmaße R ermittelt:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}_i - \bar{x})^2} \quad (4.8)$$

mit:

- \tilde{x}_i : Messwert
- \bar{x} : Mittelwert der Messwerte
- \hat{x}_i : berechneter Wert
- n : Anzahl der Messwerte.

Mithilfe des Bestimmtheitsmaßes lässt sich die Approximationsgüte zwischen berechneter und gemessener idealisierter Fließkurve bestimmen und beurteilen. Bei einer vollkommenen Übereinstimmung würde das Bestimmtheitsmaß $R = 1,0$ (100 %) betragen. Üblicherweise wird bereits bei Werten $R = 0,9$ (90 %) von einer guten Übereinstimmung ausgegangen.

Es wurden vier verschiedene Bewertungsdisziplinen definiert als Kombination aus betrachtetem Verformungsniveau, bis einschließlich Lüdersdehnung $A_{Lü}$ oder Gleichmaßdehnung A_{Gl} , und Dehnratenbereich:

- 1a: $\varepsilon_{w,pl} \leq A_{Lü}$ & Dehnratenbereich I
- 1b: $\varepsilon_{w,pl} \leq A_{Lü}$ & Dehnratenbereiche I und II
- 2a: $\varepsilon_{w,pl} \leq A_{Gl}$ & Dehnratenbereich I
- 2b: $\varepsilon_{w,pl} \leq A_{Gl}$ & Dehnratenbereiche I und II.

4.3.3 Johnson & Cook / Huh & Kang

Die Ermittlung der Modellparameter erfolgte entsprechend der in der ursprünglichen Arbeit [4] vorgeschlagenen Vorgehensweise. Hierfür wurde zunächst die Referenzdehnrate auf den arithmetischen Mittelwert der bei einer nominellen Dehnrate von $\dot{\varepsilon}_{nom} = 1/s$ ermittelten wahren plastischen Dehnraten festgelegt. Die Ermittlung der

Modellparameter B und n erfolgte mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate anhand der Fließkurve bei Referenzdehnrate. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die mathematisch beste Approximation für den Parameter A nicht in jedem Fall die Fließspannung bei der Referenzdehnrate ergab. Um physikalisch sinnvolle Ergebnisse zu erzielen, wurde daher der Parameter A vor der Approximation der Parameter B und n festgesetzt. Die Parameter C, bzw. C_1 und C_2 für das Huh & Kang Modell, wurden wiederum mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate jeweils für die Gesamtheit aller für ein Material ermittelter charakteristischer Punkte bestimmt. Die ermittelten Parametersätze für die Modelle nach Johnson & Cook und Huh & Kang sind in Tabelle 9 dargestellt.

Einen Vergleich zwischen experimentell ermittelten und mithilfe der Parameter berechneten Werte für die untere Streckgrenze sowie für die 6 % - Dehngrenze zeigt Abbildung 38 beispielhaft für Material CL. Abbildung 39 zeigt wiederum beispielhaft für Material CL die Fließkurvenscharen nach Johnson & Cook und Huh & Kang im Vergleich zu den experimentell bestimmten idealisierten Fließkurven.

Tabelle 9: Parametersätze für die Modelle nach Johnson & Cook und Huh & Kang.

Material	A	B	n	C	C_1	C_2
	[N/mm]	[N/mm]	[-]	[-]	[-]	[-]
B	434,9	1638,7	0,891	0,0263	0,0326	0,0024
CL	444,0	1834,2	0,924	0,0197	0,0232	0,0013
CQ	449,1	1711,6	0,939	0,0181	0,0253	0,0020
D	462,9	1731,9	0,935	0,0204	0,0230	0,0013
H	499,7	1229,4	0,999	0,0223	0,0272	0,0018

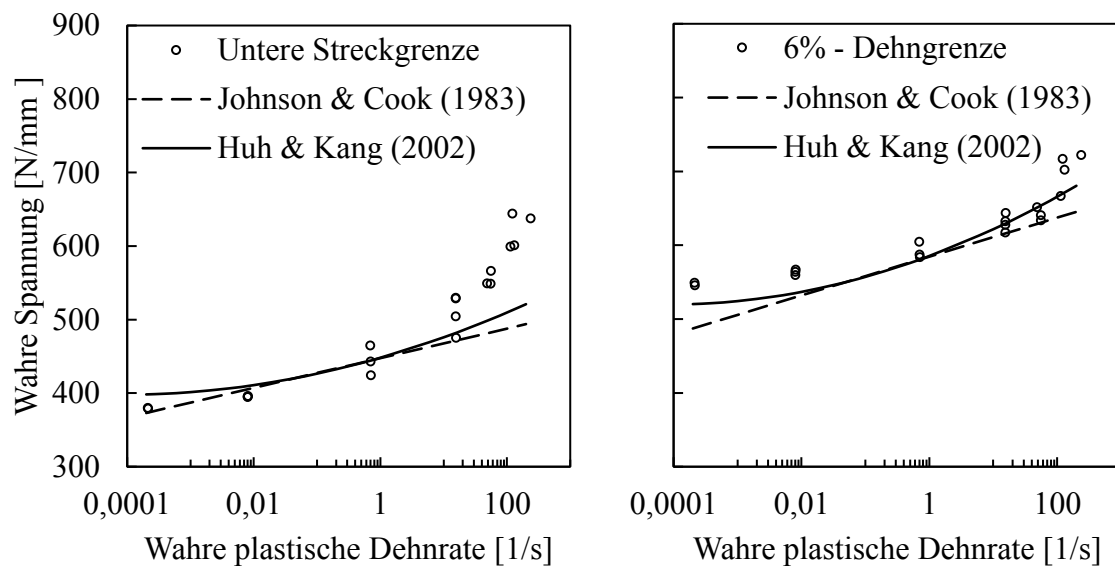


Abbildung 38: Approximation der unteren Streckgrenze (links) und der 6 % - Dehngrenze (rechts) in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnrates. Material CL - S355J2+N.

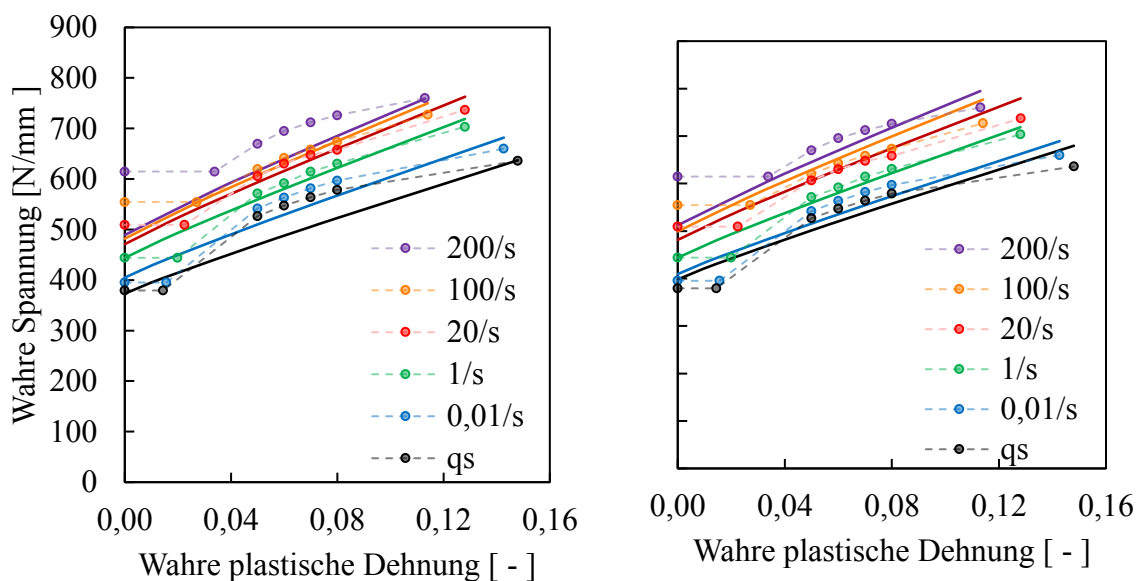


Abbildung 39: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe der Modelle nach Johnson & Cook (links) und Huh & Kang (rechts). Material CL - S355J2+N.

Insbesondere bei Betrachtung der unteren Streckgrenze wird deutlich, dass das Modell nach Johnson & Cook lediglich in einem kleinen Dehnratenbereich nahe der Referenzdehnrates eine gute Näherung zu den im Versuch ermittelten Werten berechnet.

Dies liegt an der dem Modell zugrundeliegenden linear-logarithmischen Beziehung zwischen wahrer plastischer Dehnrates und wahrer Spannung. Der Ansatz nach Huh & Kang bildet die tatsächliche Entwicklung der wahren Spannung über die wahre plastische Dehnrates besser ab. Es wird deutlich, dass durch den zusätzlichen gewichteten Term quadratischer Ordnung der überproportionale Anstieg der unteren Streckgrenze bei Erhöhung der Dehnrates bis in den Übergangsbereich zwischen Dehnratesbereich I und II gut abgebildet wird. Darüber hinaus zeigt sich, dass die in Dehnratesbereich II nochmals deutlich ansteigende Dehnratesempfindlichkeit durch den quadratisch-logarithmischen Korrekturterm nicht abgebildet werden kann. Dies führt dazu, dass die Modelle nach Johnson & Cook und Huh & Kang die Entwicklung der unteren Streckgrenze in Dehnratesbereich teilweise deutlich unterschätzen.

Das Modell nach Huh & Kang zeigt bei größeren Verformungsniveaus, wie beispielsweise hier anhand der 6 % - Dehngrenze gezeigt, eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten. Dies liegt an der mit zunehmendem Verformungsniveau abnehmenden Dehnratesempfindlichkeit (siehe Abschnitt 4.1.2). Der Verlauf der wahren Spannung über den Logarithmus der wahren plastischen Dehnrates nähert sich mit zunehmender plastischer Verformung einer linearen Beziehung an (siehe Abbildung 15), die der mathematischen Formulierung besser entspricht. Während die Dehnratesverfestigung im Falle der unteren Streckgrenze unterschätzt wird, führt der zusätzliche quadratisch-logarithmische Terms zu einer Überschätzung der Dehnratesverfestigung bei besonders großen plastischen Verformungen. So liegen die berechneten Zugfestigkeiten bei allen untersuchten Dehnrates über den im Versuch ermittelten Werten (siehe Abbildung 39, rechts).

Die aus dem Vergleich von Modell und Versuch resultierenden Bestimmtheitsmaße R für die in Abschnitt 4.3.2 definierten Bewertungsdisziplinen sind in Tabelle 20 dargestellt. Für das Huh & Kang Modell werden in allen untersuchten Fällen höhere Bestimmtheitsmaße ermittelt, was an dem zusätzlichen quadratisch-logarithmischen Korrekturterm in der Ansatzfunktion liegt. Die daraus resultierende Entwicklung der wahren Spannung über die wahre plastische Dehnrates zeigt insbesondere in Dehnratesbereich II eine bessere Übereinstimmung mit den Versuchsdaten. Mit zunehmender Differenz zwischen Referenzdehnrates $\dot{\epsilon}_0 = 1/s$ und betrachteter Dehnrates nehmen die Bestimmtheitsmaße ab, wobei die Approximationsgüte generell von Dehnratesbereich I zu II abnimmt. Die Bestimmtheitsmaße nehmen somit für beide

Modelle von Fall 1a zu 1b und von 2a zu 2b ab. Für das Johnson & Cook Modell nehmen die Bestimmtheitsmaße von Fall 1a zu 2a und von 1b zu 2b ab. Die bessere Performance des Modells nach Huh & Kang kann auf die in Dehnratenbereich I bessere Approximation der Punkte 3 bis 6 ($R_{p5\%}$ bis $R_{p8\%}$) zurückgeführt werden (siehe Abbildung 39).

Tabelle 10: Übersicht der Bestimmtheitsmaße für die Modelle nach Johnson & Cook und Huh & Kang.

		Bestimmtheitsmaß R [-]					Gesamt
Material		B	CL	CQ	D	H	
Johnson & Cook	1a	0,977	0,973	0,974	0,968	0,964	0,971
	1b	0,731	0,828	0,818	0,822	0,816	0,803
	2a	0,935	0,938	0,915	0,924	0,930	0,928
	2b	0,709	0,828	0,780	0,836	0,688	0,768
Huh & Kang	1a	0,969	0,962	0,959	0,956	0,949	0,959
	1b	0,831	0,869	0,895	0,868	0,832	0,859
	2a	0,964	0,953	0,938	0,950	0,964	0,954
	2b	0,840	0,881	0,898	0,890	0,822	0,866

4.3.4 Cowper & Symonds

Das Modell nach Cowper & Symonds [3] soll in dieser Arbeit als sogenanntes „overstress“-Modell verstanden werden, das die bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelte Referenz-Fließkurve dehnratenabhängig skaliert. Als Referenz-Fließkurven sollen die nach Abschnitt 4.3.1 ermittelten idealisierten Fließkurven aus den Mittelwerten der charakteristischen Punkte dienen. Im Gegensatz zu den Modellen nach Johnson & Cook und Huh & Kang kann das Modell somit das baustahltypische Fließplateau berücksichtigen. Die in Abschnitt 4.1 dargestellte dehnratenabhängige Veränderung der Verformungskennwerte und der Verfestigungseigenschaften sowie die sich dadurch einstellende Formänderung der Fließkurve wird jedoch nicht berücksichtigt. Die Referenz-Fließkurve wird bei Erhöhung der Dehnraten lediglich in Ordinate-Richtung zu höheren Spannungen verschoben. Die Ermittlung der Modellparameter C und p erfolgte mithilfe der Methode der kleinsten

Fehlerquadrate. Die ermittelten Parametersätze für das Modell nach Cowper & Symonds sind in Tabelle 11 dargestellt.

Die approximierten Entwicklungen von unterer Streckgrenze und 6 % - Dehngrenze über die wahre plastische Dehnrates im Vergleich mit den gemessenen Werten ist in Abbildung 40 beispielhaft für Material CL dargestellt. Einen Vergleich der ermittelten Fließkurvenscharen nach Cowper & Symonds mit den experimentell bestimmten idealisierten Fließkurven zeigt Abbildung 41. Bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit findet keine Skalierung der Referenz-Fließkurve statt. Die approximierten Werte nach Cowper & Symonds sind daher identisch mit den Versuchsdaten und die für diese Dehnrates bestimmten Residuen sind gleich Null.

Tabelle 11: Parametersätze für das Modell nach Cowper & Symonds.

Material	C	p
	[1/s]	[-]
B	0,2799	18,64
CL	0,0253	35,93
CQ	0,1944	26,66
D	0,0100	39,06
H	0,1436	24,24

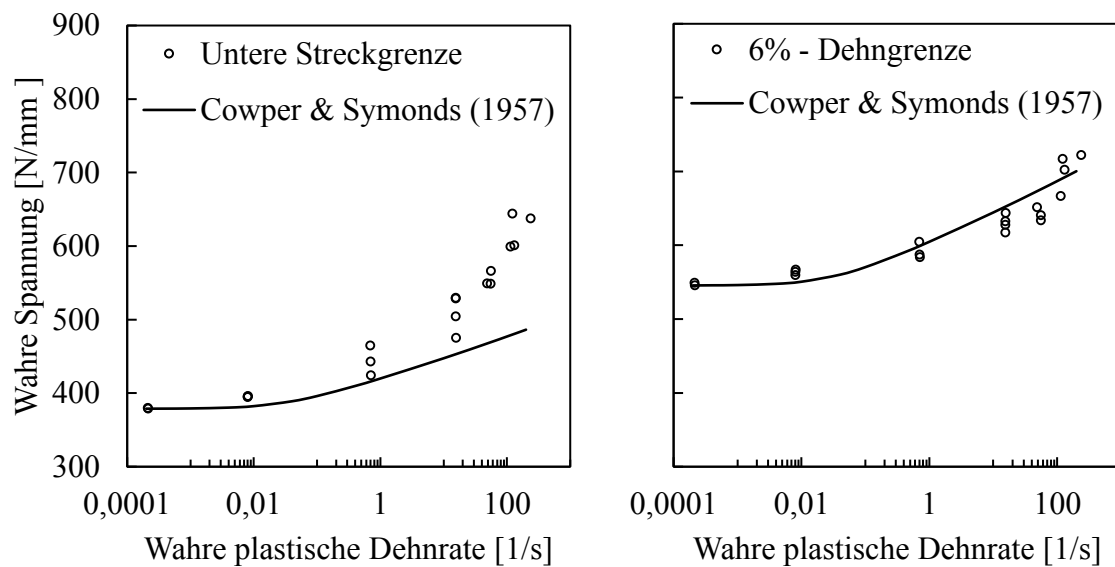


Abbildung 40: Approximation der unteren Streckgrenze (links) und der 6 % - Dehngrenze (rechts) in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnrate. Material CL - S355J2+N.

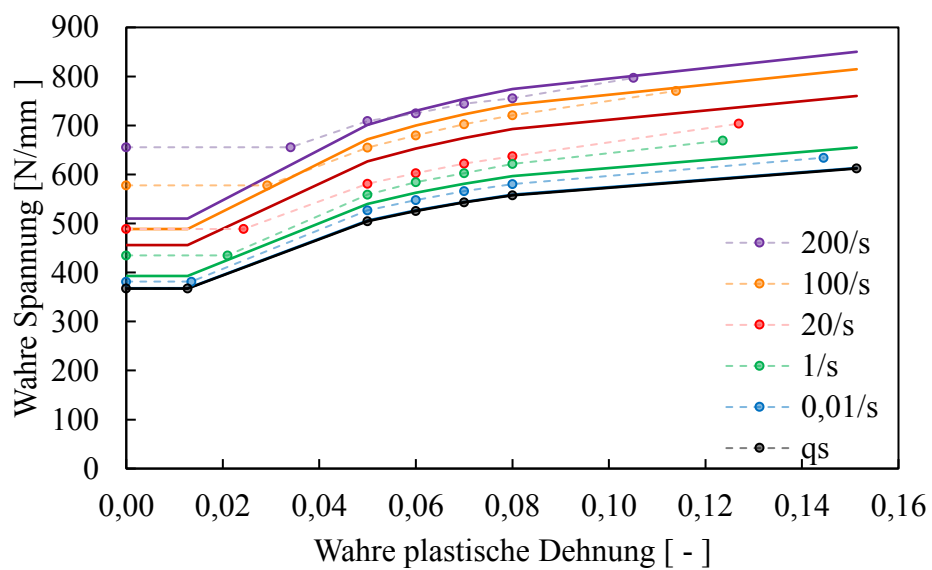


Abbildung 41: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe des Modells nach Cowper & Symonds. Material CL - S355J2+N.

Das Modell nach Cowper & Symonds beschreibt die Spannung in Abhängigkeit der Dehnrates mithilfe einer Exponentialfunktion. Bei der üblichen Auftragung der wahren Spannung über den Logarithmus der wahren plastischen Dehnrates stellt sich somit ein überproportionaler Anstieg ein. Dieser ist jedoch unabhängig von dem betrachteten Verformungsniveau, bzw. konstant über die gesamte Referenz-Fließkurve. In Abbildung 40 wird deutlich, dass die durch das Modell beschriebene Dehnratenverfestigung für die Entwicklung der 6 % - Dehngrenze (rechts) eine gute Übereinstimmung zeigt, jedoch bei der unteren Streckgrenze (links) aufgrund der größeren Dehnratenempfindlichkeit insbesondere in Dehnratenbereich II unterschätzt wird.

Bei der Betrachtung der in Tabelle 12 dargestellten resultierenden Bestimmtheitsmaße R für die in Abschnitt 4.3.2 definierten Bewertungsdisziplinen wird deutlich, dass die Approximationsgüte jeweils von Fall 1a zu 1b und von 2a zu 2b sinkt. Dies kann auf die in Dehnratenbereich II deutlich unterschätzte Dehnratenempfindlichkeit der unteren Streckgrenze (Punkte 1 und 2, Tabelle 8) zurückgeführt werden. Das Bestimmtheitsmaß nimmt somit insbesondere für niedrige Verformungsniveaus von kleinen zu großen Dehnraten ab. Bei höheren Verformungsniveaus ($R_{p5\%}$ bis $R_{p8\%}$) wird dagegen auch in Dehnratenbereich II eine hohe Approximationsgüte erzielt. Die Differenz zwischen Fall 1a und 1b ist demgemäß größer als zwischen Fall 2a und 2b. Dies führt auch dazu, dass bei Beurteilung der gesamten approximierten Fließkurve (Fall 2b) ein höheres Bestimmtheitsmaß ermittelt wird, als für die einzelne Betrachtung des Fließplateaubereiches (Fall 1b).

Tabelle 12: Übersicht der Bestimmtheitsmaße für das Modell nach Cowper & Symonds.

		Bestimmtheitsmaß R [-]					Gesamt
Material		B	CL	CQ	D	H	
Cowper & Symonds	1a	0,975	0,988	0,974	0,993	0,955	0,977
	1b	0,624	0,669	0,707	0,725	0,775	0,700
	2a	0,972	0,988	0,974	0,987	0,966	0,977
	2b	0,732	0,773	0,795	0,805	0,746	0,770

4.3.5 Kühn

Das in der Arbeit von Kühn [10] vorgestellte Modell nach Gleichung (2.22) beschreibt die untere Streckgrenze in Abhängigkeit wahren plastischen Dehnrate $\dot{\epsilon}_{pl}$, der Prüftemperatur T , der quasistatischen unteren Streckgrenze bei Raumtemperatur $R_{eL,RT}$. Der zu approximierende Exponent m berücksichtigt die für normal- und hochfeste Baustähle unterschiedliche Dehnratenempfindlichkeit und kann nach Kühn für Baustahl S355 zu $m_{Kühn} = 3,27$ angenommen werden.

In dieser Arbeit wurde zunächst die Approximationsgüte unter Verwendung des empfohlenen Exponenten $m_{Kühn}$ ermittelt. Im Anschluss wurden unter Verwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate der Exponent m_{Fit} approximiert. Die ermittelten Exponenten m_{Fit} für das Modell nach Kühn sind in Tabelle 13 dargestellt.

Die approximierten Exponenten m_{Fit} liegen mit Ausnahme von Material B innerhalb des in der Arbeit von Kühn in einer Literaturrecherche ermittelten Wertebereiches von $2,7 < m < 3,5$. Der Exponent m ist als Maß für die Dehnratenempfindlichkeit zu sehen und steigt nach Kühn [10] tendenziell einer linearen Beziehung folgend mit steigender Festigkeit und abnehmender Korngröße an. Auch bei den in dieser Arbeit untersuchten Baustählen kann demgemäß befunden werden. Die Werte steigen von Material B mit vergleichsweise geringer Festigkeit und grobem Korn zu Material H mit vergleichsweise hoher Festigkeit und feinem Korn an. Insgesamt betrachtet liegen die Werte jedoch unterhalb des von Kühn empfohlenen Wertes.

Tabelle 13: Parametersätze für das Modell nach Kühn.

	$m_{Kühn}$	m_{Fit}
Material	[-]	[-]
B	3,27	2,59
CL	3,27	2,71
CQ	3,27	2,77
D	3,27	2,80
H	3,27	2,97

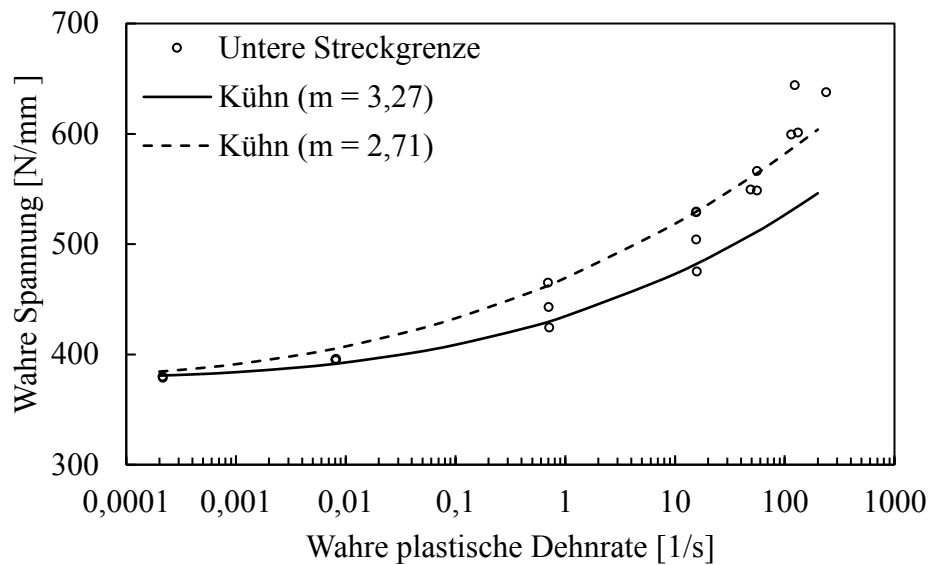


Abbildung 42: Approximation der unteren Streckgrenze in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnrates nach dem Modell Kühn. Material CL - S355J2+N.

Abbildung 42 zeigt beispielhaft für Material CL die gemessenen Einzelwerte der unteren Streckgrenze in Abhängigkeit der wahren plastischen Dehnrates. Für einen direkten Vergleich sind die Entwicklungen nach dem Modell nach Kühn unter Verwendung des empfohlenen Exponenten $m_{\text{Kühn}} = 3,27$ und des approximierten Exponenten $m_{\text{Kühn}} = 2,71$ dargestellt. Es zeigt sich, dass die Wahl des Exponenten m einen signifikanten Einfluss auf den Kurvenverlauf hat. Erwartungsgemäß wird unter Verwendung des empfohlenen Exponenten $m_{\text{Kühn}} = 3,27$ insbesondere in Dehnratenbereich II die Entwicklung der unteren Streckgrenze unterschätzt. Dagegen wird deutlich, dass das Modell nach Kühn nach Anpassung des Exponenten m die bei hohen Dehnrates deutlich ansteigende Dehnratesempfindlichkeit der unteren Streckgrenze abbilden kann. Die aus dem Vergleich von Modell und Versuch resultierenden Bestimmtheitsmaße R für die in Abschnitt 4.3.2 definierten Bewertungsdisziplinen sind in Tabelle 14 dargestellt. Bei ausschließlicher Betrachtung von Dehnratesbereich I (Fall 1a) wird auch mit dem empfohlenen Exponenten $m_{\text{Kühn}} = 3,27$ eine hohe Approximationsgüte erreicht. Eine gesonderte Anpassung des Exponenten bringt hier keine Verbesserung. Bei Betrachtung des gesamten untersuchten Dehnratesbereiches (Fall 1b) ist eine Verringerung des Bestimmtheitsmaßes R infolge der Unterschätzung der Dehnratesempfindlichkeit in Dehnratesbereich II zu beobachten. Die Verwendung eines angepassten Exponenten m_{Fit} bringt hier eine deutliche Verbesserung der Approximationsqualität.

Tabelle 14: Übersicht der Bestimmtheitsmaße für das Modell nach Kühn.

Material	Bestimmtheitsmaß R [-]						Gesamt
	B	CL	CQ	D	H		
Kühn: $m_{\text{Kühn}}$	1a	0,997	0,996	0,997	0,995	0,990	0,995
	1b	0,721	0,891	0,906	0,903	0,923	0,869
Kühn: m_{Fit}	1a	0,987	0,991	0,995	0,994	0,998	0,993
	1b	0,913	0,969	0,983	0,986	0,972	0,965

4.3.6 Vorschlag eines neuen Modells

4.3.6.1 Allgemein

Für das neue Materialmodell wird die Fließkurve in zwei Abschnitte, Fließplateau und Verfestigungsbereich, unterteilt. Das Fließplateau reicht von 0 % wahrer plastischer Dehnung bis zur Lüdersdehnung A_{Li} . Der Verfestigungsbereich schließt an das Fließplateau an und reicht bis zur Gleichmaßdehnung A_{Gl} . Beide Bereiche werden getrennt voneinander durch zwei unterschiedliche Funktionen I und II beschrieben. Die gesamte Fließkurve wird durch eine Maximalfunktion beschrieben:

$$\sigma_f(\varepsilon_{\text{pl}}, \dot{\varepsilon}_{\text{pl}}) = \max \begin{cases} \text{I: } R_{\text{eL}}(\dot{\varepsilon}_{\text{pl}}) \\ \text{II: } \sigma_f(\varepsilon_{\text{pl}}, \dot{\varepsilon}_{\text{pl}}) \end{cases} \quad (4.9)$$

Für die Approximation der unteren Streckgrenze durch Funktion I wurden drei unterschiedliche Funktionstypen untersucht. Neben einer Potenzfunktion und einer Logarithmus-Funktion zur Basis e (LN-Funktion) wurde hierfür der Ansatz nach Kühn [10] verwendet. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.3.6.2 dargestellt.

Auch für die Approximation des Verfestigungsbereiches durch Funktion II wurden unterschiedliche Funktionstypen hinsichtlich der Approximationsgüte untersucht. Hierzu wurden die in Abschnitt 2.3 gezeigten Materialmodelle nach Hollomon [41] und Swift [42] als Ansatzfunktionen genutzt. Diese werden üblicherweise zur Beschreibung des Fließ- und Verfestigungsverhaltens bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit verwendet. Die sich ergebenden jeweiligen Modellparameter wurden im Anschluss auf

ihre Dehnratenabhängigkeit untersucht und wiederum mithilfe von Ansatzfunktionen approximiert. Die sich daraus ergebenden verschiedenen Kombinationen der Ansatzfunktionen sind in Abschnitt 4.3.6.3 dargestellt.

Entsprechend der in Abschnitt 2.3 dargestellten bestehenden Materialmodelle soll das neue Modell auf Grundlage von wahren plastischen Dehnraten $\dot{\epsilon}_{pl}$ definiert werden. Eine Referenzdehnrates $\dot{\epsilon}_0 = 1/s$ soll zudem zur Anpassung der Einheiten dienen.

4.3.6.2 Funktion I: Untere Streckgrenze

Aufgrund der in den Abschnitten 4.3.3 und 4.3.4 dargestellten Ergebnissen sollen die Ansätze nach Johnson & Cook, Huh & Kang und Cowper & Symonds zur dehnratenabhängigen Beschreibung der unteren Streckgrenze nicht weiter verfolgt werden. Neben dem Ansatz nach Kühn [10] (Gleichung (2.22)) sollen in dieser Arbeit eine Potenzfunktion (Gleichung (4.10)) und eine LN-Funktion (Gleichung (4.11)) für die Approximation verwendet werden:

$$R_{eL}(\dot{\epsilon}_{pl}) = r_a + r_b \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{r_c} \quad (4.10)$$

$$R_{eL}(\dot{\epsilon}_{pl}) = r_a + r_b \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) + r_c \cdot \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right). \quad (4.11)$$

Die mithilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelten Modellparameter für die beiden Ansätze unter Verwendung einer Potenzfunktion (Potenzansatz) und einer LN-Funktion (LN-Ansatz) sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Übersicht der Modellparameter für den Potenz- und den LN-Ansatz zur dehnratenabhängigen Beschreibung der unteren Streckgrenze.

Material	Potenzansatz			LN-Ansatz		
	ra	rb	rc	ra	rb	rc
B	383,09	40,04	0,39	445,10	1,27	11,06
CL	373,80	70,09	0,25	466,00	0,57	12,62
CQ	383,91	72,07	0,24	467,73	0,70	10,88
D	386,47	90,19	0,19	495,78	0,28	13,15
H	436,11	53,74	0,27	503,63	0,80	9,81

Beispielhaft für Material CL zeigt Abbildung 43 die Entwicklung der im Versuch ermittelten Einzel- und Mittelwerte der unteren Streckgrenze über die wahre plastische Dehnrate sowie die mithilfe der untersuchten Ansatzfunktionen berechneten Kurvenverläufe. Alle drei untersuchten Ansätze berücksichtigen den überproportionalen Anstieg der unteren Streckgrenze bei einer Erhöhung der Dehnrate sowie die deutlich größere Dehnratenempfindlichkeit in Dehnratenbereich II gegenüber Dehnratenbereich I.

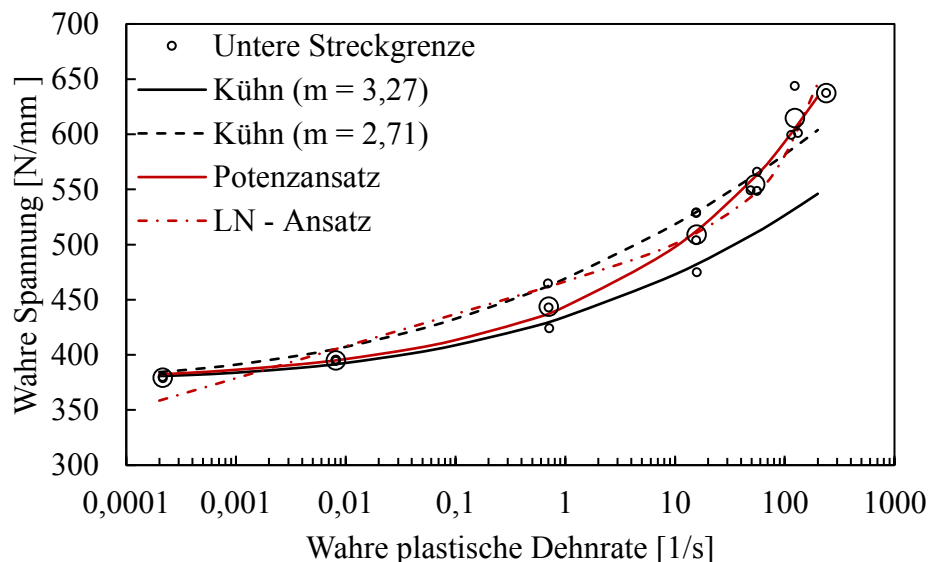


Abbildung 43: Approximation der unteren Streckgrenze durch die untersuchten Ansatzfunktionen. Darstellung von Einzel- und Mittelwerten als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

Problematisch erscheint hierbei der LN-Ansatz, der einen nahezu linear-logarithmischen Verlauf mit einer deutlichen Steigung in Dehnratenbereich I zeigt. Bei Dehnraten $\dot{\varepsilon}_{pl} < 0,00025/s$ unterschätzt dieser Ansatz daher den im quasistatischen Dehnratenbereich in eine Horizontale übergehenden Verlauf der unteren Streckgrenze deutlich. Dennoch zeigt sich, dass bei alleiniger Betrachtung von Dehnratenbereich I (Fall 1a) alle untersuchten Ansatzfunktionen eine hohe Approximationsgüte vorweisen. Bei Betrachtung beider Dehnratenbereiche (Fall 1b) weist das Modell nach Kühn die niedrigsten Bestimmtheitsmaße vor, wobei die Anpassung des Exponenten m eine Verbesserung gegenüber des von Kühn empfohlenen Wertes bringt. Der Potenzansatz weist in beiden Fällen 1a und 1b die höchsten Bestimmtheitsmaße vor und soll daher für die dehnratenabhängige Beschreibung der unteren Streckgrenze als Funktion I empfohlen werden. Die resultierenden Bestimmtheitsmaße R sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Übersicht der resultierenden Bestimmtheitsmaße.

		Bestimmtheitsmaß R [-]					
Material		B	CL	CQ	D	H	Gesamt
Potenzansatz	1a	0,994	0,997	0,999	0,997	0,991	0,996
	1b	0,976	0,986	0,995	0,992	0,969	0,984
LN-Ansatz	1a	0,997	0,990	0,996	0,985	0,997	0,993
	1b	0,977	0,976	0,99	0,977	0,971	0,978
Kühn: $m_{Kühn}$	1a	0,997	0,996	0,997	0,995	0,990	0,995
	1b	0,721	0,891	0,906	0,903	0,923	0,869
Kühn: m_{Fit}	1a	0,987	0,991	0,995	0,994	0,998	0,993
	1b	0,913	0,969	0,983	0,986	0,972	0,965

4.3.6.3 Funktion II: Verfestigungsbereich

Vorgehensweise

Die grundsätzliche Vorgehensweise zur Approximation des Verfestigungsbereiches durch Funktion II ist nachfolgend dargestellt:

- Approximieren der einzelnen Fließkurven ohne Berücksichtigung des Fließplateaus unter Verwendung bestehender Verfestigungsmodelle (siehe Abschnitt 2.3). Hierfür wurden die Ansätze nach Hollomon (Gleichung (4.12)) und Swift (Gleichung (4.13)) verwendet:

$$\sigma_w(\varepsilon_{w,pl}) = A \cdot (\varepsilon_{w,pl})^B \quad (4.12)$$

$$\sigma_w(\varepsilon_{w,pl}) = A \cdot (B + \varepsilon_{w,pl})^C \quad (4.13)$$

- Approximieren der sich für die verschiedenen Verfestigungsmodelle ergebenden Modellparameter A, B und C über die wahre plastische Dehnrates mithilfe verschiedener Ansatzfunktionen. Die verwendeten Ansatzfunktionen wurden einheitlich mit den Zahlen „1“ bis „3“ belegt und sind im Folgenden beispielhaft für den Parameter $A(\dot{\varepsilon}_{pl})$ dargestellt:

$$\text{„1“: } A(\dot{\varepsilon}_{pl}) = aa + ab \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^{ac} \quad (4.14)$$

$$\text{„2“: } A(\dot{\varepsilon}_{pl}) = aa + ab \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + ac \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \quad (4.15)$$

$$\text{„3“: } A(\dot{\varepsilon}_{pl}) = aa + ab \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) + ac \cdot \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)^2 \quad (4.16)$$

- Approximation der dehnratenabhängigen Veränderung der Gleichmaßdehnung durch eine einfache LN-Funktion (siehe Gleichung (4.17)). Je nach betrachteter Dehnrates wird die Gleichmaßdehnung als Grenzwert der wahren plastischen Dehnung in Funktion II berücksichtigt.

$$A_{Gl}(\dot{\varepsilon}_{pl}) = ga + gb \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right). \quad (4.17)$$

Die sich ergebenden Kombinationen der verwendeten Ansatzfunktionen für die Approximation der Modellparameter der untersuchten Verfestigungsmodelle wurden nach einem einheitlichen Schema bezeichnet. Demnach folgen der Bezeichnung des verwendeten Verfestigungsmodells die zahlenmäßigen Bezeichnungen der verwendeten Ansatzfunktionen für die Approximation der Modellparameter A, B und C.

Beispielhaft für das Verfestigungsmodell Swift und die alleinige Verwendung von Potenzfunktionen für die Approximation der Modellparameter A, B und C lautet die Bezeichnung „Swift 1.1.1“.

Insgesamt ergeben sich für die zwei Verfestigungsmodelle fünf Kombinationen der verwendeten Ansatzfunktionen, die in diesem Abschnitt hinsichtlich ihrer Approximationsqualität untersucht werden sollen. Bei allen Kombinationen wurde die untere Streckgrenze mithilfe des in Abschnitt 4.3.6.2 gezeigten Potenzansatzes bestimmt. Die untersuchten Kombinationen sind in Tabelle 17 dargestellt. Die ermittelten Parametersätze sind im Anhang A.1 gegeben.

Tabelle 17: Kombinationen der Ansatzfunktionen für die Approximation der Modellparameter A, B und C für die untersuchten Verfestigungsmodelle.

Parameter	Swift 1.1.1	Swift 2.2.2	Swift 2.3.3	Hollomon 1.1	Hollomon 2.2
Ansatzfunktion					
A	(4.14)	(4.15)	(4.15)	(4.14)	(4.15)
B	(4.14)	(4.15)	(4.16)	(4.14)	(4.15)
C	(4.14)	(4.15)	(4.16)	-	-

In den folgenden Abschnitten soll nun auf die untersuchten Verfestigungsmodelle nach Swift und Hollomon eingegangen werden.

Ansatz nach Swift

Für den Ansatz nach Swift, siehe Gleichung (4.13), ergaben sich drei Kombinationen unterschiedlicher Ansatzfunktionen zur Approximation der drei Modellparameter A bis C. Abbildung 44 zeigt beispielhaft für Material CL die Entwicklung der Einzel- und Mittelwerte der Modellparameter über die wahre plastische Dehnrates. Die Verläufe aller drei Parameter wurden entsprechend der Kombination Swift 1.1.1 mithilfe von Potenzfunktionen, siehe Gleichung (4.14), approximiert. Es kann beobachtet werden, dass die Parameterverläufe jeweils eindeutige Tendenzen aufweisen, die über die wahre plastische Dehnrates mit geringem Aufwand approximiert werden können.

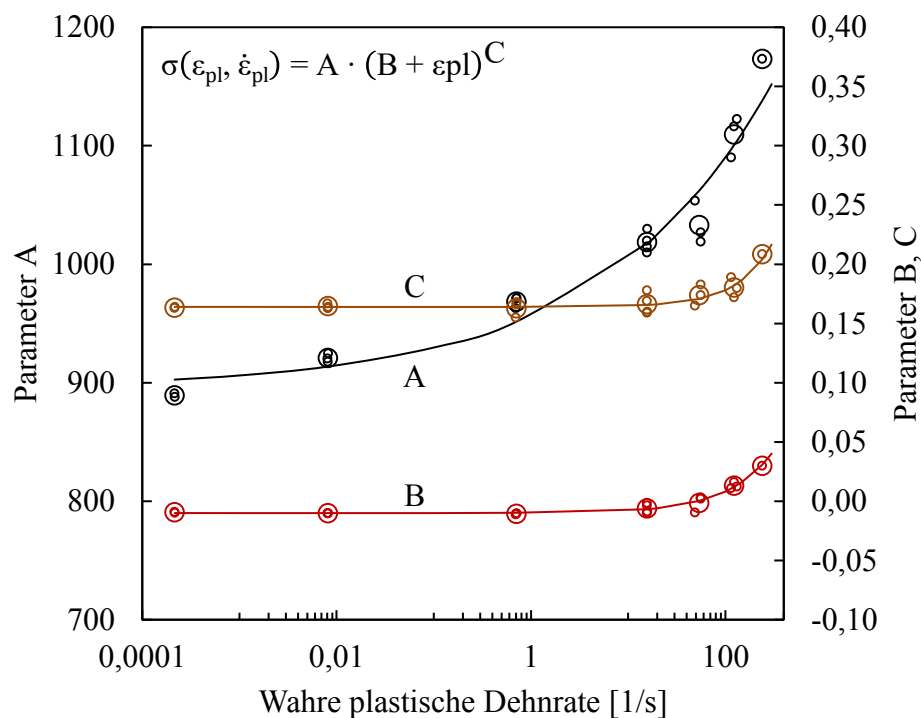


Abbildung 44: Ansatz Swift 1.1.1: Entwicklung der Parameter A, B und C über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung von Einzel- und Mittelwerten als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

Durch die geschwindigkeitsabhängige Beschreibung aller Modellparameter wird erreicht, dass das bekannte Verfestigungsmodell nach Swift die dehnratenabhängige Verschiebung und Formänderung der Fließkurve abbildet. Abbildung 45 zeigt die approximierte Fließkurvenschar im Vergleich zu den experimentell bestimmten idealisierten Fließkurven (vgl. Abschnitt 4.3.1) beispielhaft für Material CL. Für Funktion I wurde ein Potenzansatz gewählt, für Funktion II die Kombination Swift 1.1.1 nach Tabelle 17. Dies zeigt, dass das neue Modell sowohl die Fließplateauhöhe als auch den weiteren Verlauf der Fließkurve bis zur Gleichmaßdehnung für die untersuchten Dehnraten in guter Näherung abbilden kann.

Eine Übersicht der für die Fälle 2a) und 2b) ermittelten Bestimmtheitsmaße zeigt Tabelle 18. Demnach zeigen alle untersuchten Varianten nahezu identische Bestimmtheitsmaße, wobei die Approximationsgüte erwartungsgemäß von Fall 2a) zu 2b) abnimmt.

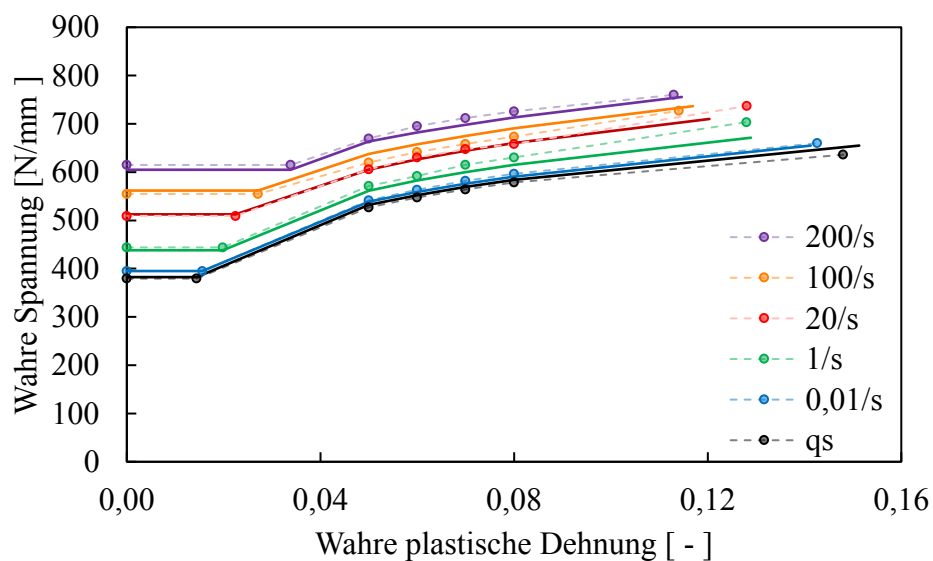


Abbildung 45: Ansatz Swift 1.1.1: Approximation der Fließkurvenschar. Material B - S355J2+N.

Tabelle 18: Übersicht der resultierenden Bestimmtheitsmaße.

Material		Bestimmtheitsmaß R [-]					Gesamt
		B	CL	CQ	D	H	
Swift 1.1.1	2a	0,993	0,991	0,998	0,996	0,989	0,993
	2b	0,950	0,973	0,992	0,986	0,954	0,971
Swift 2.2.2	2a	0,991	0,995	0,999	0,994	0,988	0,993
	2b	0,946	0,979	0,991	0,983	0,953	0,970
Swift 2.3.3	2a	0,991	0,995	0,998	0,995	0,990	0,994
	2b	0,954	0,979	0,991	0,983	0,955	0,972

Ansatz nach Hollomon

Für den Ansatz nach Hollomon, siehe Gleichung (4.12), ergaben sich zwei Kombinationen unterschiedlicher Ansatzfunktionen zur Approximation der Modellparameter A und B. Abbildung 46 zeigt die Entwicklung der Einzel- und Mittelwerte der Modellparameter über die wahre plastische Dehnrates beispielhaft für Material CL und die Kombination Hollomon 1.1.

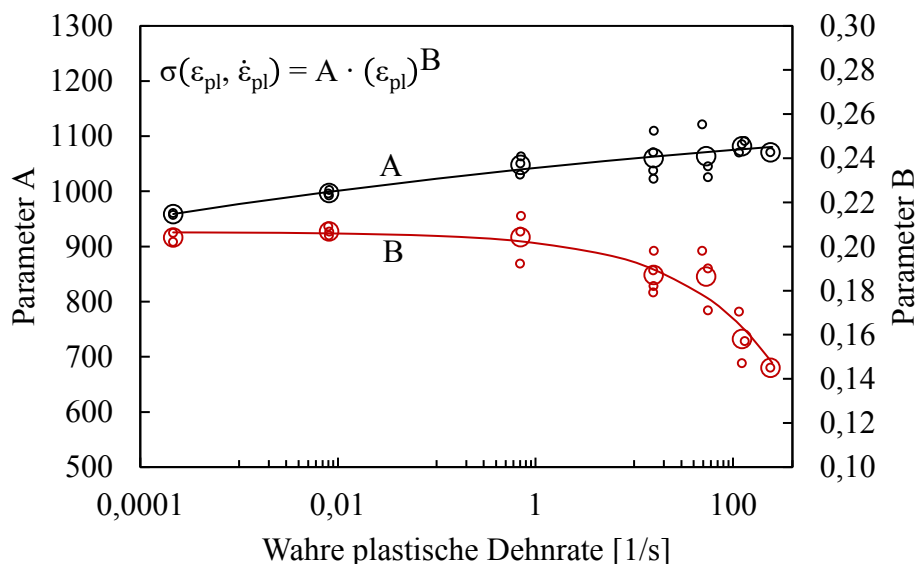


Abbildung 46: Hollomon 1.1: Entwicklung der Parameter A und B über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung von Einzel- und Mittelwerten als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

Auch die Verläufe der Parameter A und B des Hollomon Verfestigungsmodells weisen jeweils eindeutige Tendenzen auf, die über die wahre plastische Dehnrates mit geringem Aufwand approximiert werden können. Demnach kann der Befund nach Soliman [7], nach dem für zunehmende Dehnrates steigende A- und sinkende B-Werte zu erwarten sind, einschränkend bestätigt werden. Es zeigt sich, dass Parameter B nicht über den gesamten untersuchten Dehnratesbereich abfällt, sondern in Dehnratesbereich I zunächst leicht ansteigt bzw. einen nahezu horizontalen Verlauf beschreibt. Da der Exponent B maßgeblich die Steilheit der Fließkurve beeinflusst, ist somit bei niedrigen Dehnrates auch von einem leichten Anstieg bzw. einer annähernd konstanten Verformungsverfestigung des Materials auszugehen. Erst bei hohen Dehnrates treten ein Abflachen der Fließkurve und eine Abnahme der Verformungsverfestigung ein. Dies entspricht den Erkenntnissen, die in Abschnitt 4.1.3 dargestellt sind.

Abbildung 47 zeigt die approximierten Fließkurvenschar beispielhaft für Material CL und für die Kombination Hollomon 1.1. Bei Betrachtung der ermittelten Bestimmtheitsmaße, siehe Tabelle 19, fällt auf, dass die zwei untersuchten Kombinationen annähernd identische Bestimmtheitsmaße aufweisen. Im Vergleich zu den untersuchten Swift-Varianten (Tabelle 18) wird ersichtlich, dass auch hier keine großen Differenzen auftreten und beide Verfestigungsmodelle ähnlich hohe Bestimmtheitsmaße aufweisen.

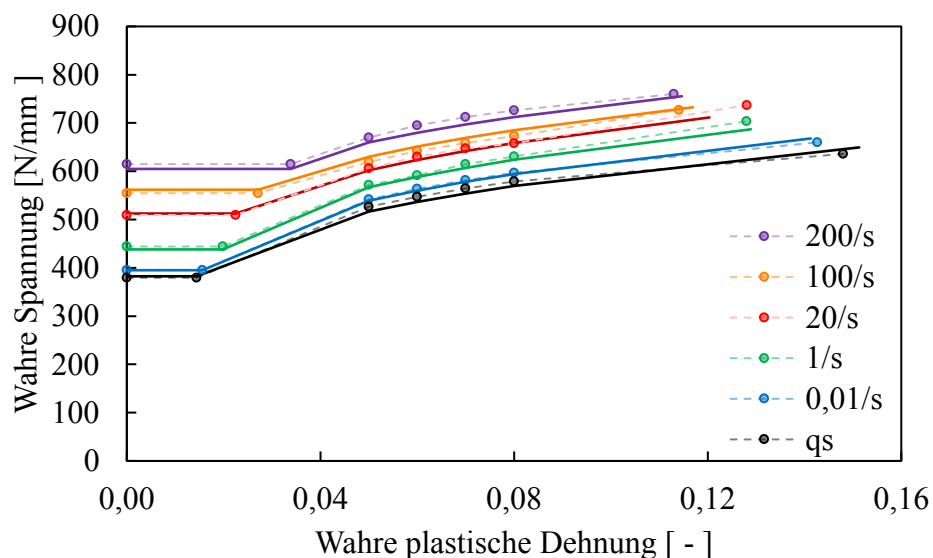


Abbildung 47: Ansatz Hollomon 1.1: Approximation der Fließkurvenschar. Material CL - S355J2+N.

Tabelle 19: Übersicht der resultierenden Bestimmtheitsmaße.

Material	Bestimmtheitsmaß R [-]						Gesamt
		B	CL	CQ	D	H	
Hollomon 1.1	2a	0,988	0,994	0,998	0,995	0,987	0,992
	2b	0,948	0,977	0,99	0,976	0,948	0,968
Hollomon 2.2	2a	0,992	0,996	0,999	0,994	0,992	0,994
	2b	0,946	0,979	0,991	0,983	0,953	0,970

4.3.7 Diskussion und Modellbewertung

Abschließend sollen nun die untersuchten bekannten Modelle sowie das in dieser Arbeit vorgeschlagene neue Modell hinsichtlich der Eignung für die untersuchten Baustähle verglichen werden. Dabei soll auf die in Abschnitt 4.3.2 definierten vier Fälle 1a), 1b), 2a) und 2b) eingegangen werden.

Fall 1a) $\varepsilon_{w,pl} \leq A_{Lü}$ & Dehnratenbereich I

Tabelle 20 zeigt eine Übersicht über die für Fall 1a) ermittelten Bestimmtheitsmaße R. Alle untersuchten Modelle weisen Bestimmtheitsmaße auf, die auf eine gute Übereinstimmung von Versuchsdaten und Berechnungswerten schließen lassen. Dies war zu erwarten, da Fall 1a) einen vergleichsweise kleinen Teil der Fließkurve sowie einen kleinen Teil des untersuchten Dehnratenbereiches abbildet. Aufgrund der zugrundeliegenden mathematischen Formulierungen zeigten die Modelle nach Johnson & Cook, Huh & Kang, Cowper & Symonds sowie nach Kühn, dass diese den Spannungsanstieg der unteren Streckgrenze in Dehnratenbereich II teilweise deutlich unterschätzen. Bei niedrigen Dehnraten jedoch konnte für die untere Streckgrenze ein nahezu linear-logarithmischer Verlauf über die wahre plastische Dehnratenrate bei einer insgesamt niedrigen Dehnratenempfindlichkeit beobachtet werden.

Tabelle 20: Übersicht der ermittelten Bestimmtheitsmaße für Fall 1a).

Modell	B	CL	CQ	D	H	Gesamt
Johnson & Cook (1983)	0,977	0,973	0,974	0,968	0,964	0,971
Huh & Kang (2002)	0,969	0,962	0,959	0,956	0,949	0,959
Cowper & Symonds (1957)	0,975	0,988	0,974	0,993	0,955	0,977
Kühn (2005): $m_{\text{Kühn}}$	0,997	0,996	0,997	0,995	0,990	0,995
Kühn (2005): m_{Fit}	0,987	0,991	0,995	0,994	0,998	0,993
Potenzansatz	0,994	0,997	0,999	0,997	0,991	0,996
LN-Ansatz	0,997	0,990	0,996	0,985	0,997	0,993

Fall 1b) $\varepsilon_{w,pl} \leq A_{Lü}$ & Dehnratenbereiche I und II

Tabelle 21 zeigt eine Übersicht über die für Fall 1b) ermittelten Bestimmtheitsmaße R . Gegenüber Fall 1a) fallen die Werte der Bestimmtheitsmaße deutlich ab. Dies kann auf die den Modellen zugrundeliegenden mathematischen Formulierungen zurückgeführt werden, die den deutlichen Anstieg der Dehnratenempfindlichkeit in Dehnratenbereich II nicht hinreichend genau abbilden können. Gegenüber der ursprünglichen Formulierung nach Johnson & Cook bildet die Modifikation nach Huh & Kang den überproportionalen Anstieg der unteren Streckgrenze bei Erhöhung der Dehnrates nur bis in den Übergangsbereich zwischen Dehnratenbereich I und II besser ab. Darüber hinaus unterschätzt auch das Modell nach Huh & Kang die Dehnratenverfestigung der unteren Streckgrenze.

Das Modell nach Kühn zeigt insbesondere unter Verwendung des angepassten Exponenten m_{Fit} eine höhere Approximationsqualität als die „klassischen“ Modelle nach Johnson & Cook, Huh & Kang und Cowper & Symonds. Nochmals höhere Werte der Bestimmtheitsmaße werden bei Verwendung des LN-Ansatzes und insbesondere des Potenzansatzes erreicht.

Tabelle 21: Übersicht der ermittelten Bestimmtheitsmaße für Fall 1b).

Modell	B	CL	CQ	D	H	Gesamt
Johnson & Cook (1983)	0,731	0,828	0,818	0,822	0,816	0,803
Huh & Kang (2002)	0,831	0,869	0,895	0,868	0,832	0,859
Cowper & Symonds (1957)	0,624	0,669	0,707	0,725	0,775	0,700
Kühn (2005): $m_{\text{Kühn}}$	0,721	0,891	0,906	0,903	0,923	0,869
Kühn (2005): m_{Fit}	0,913	0,969	0,983	0,986	0,972	0,965
Potenzansatz	0,976	0,986	0,995	0,992	0,969	0,984
LN-Ansatz	0,977	0,976	0,990	0,977	0,971	0,978

Fall 2a) $\varepsilon_{w,pl} \leq A_{Gl}$ & Dehnratenbereich I

Tabelle 22 zeigt eine Übersicht über die für Fall 2a) ermittelten Bestimmtheitsmaße R . Für die dehnratenabhängige Beschreibung der gesamten Fließkurve bei alleiniger Betrachtung von Dehnratenbereich I werden mit allen untersuchten Modellen Bestimmtheitsmaße größer 0,9 erreicht, was einer guten Übereinstimmung entspricht. Obwohl das Fließplateau durch die Modelle nach Johnson & Cook und Huh & Kang nicht abgebildet werden kann, zeigen auch diese eine insgesamt hohe Approximationsqualität. Das Modell nach Cowper & Symonds skaliert die bei quasistatischer Beanspruchungsqualität ermittelte Fließkurve in Abhängigkeit der betrachteten Dehnraten in Ordinate-Richtung. Wie in Abschnitt 4.1.2 dargestellt wurde, ist die Dehnratenempfindlichkeit jedoch von der plastischen Verformung abhängig. Eine Approximation der Modellparameter kann daher nur für ein Verformungsniveau erfolgen, was zu einer niedrigen Approximationsqualität entweder für geringe oder große plastische Dehnungen führt. Bei den in dieser Arbeit vorgestellten Modellen auf Basis des Swift- und des Hollomon-Ansatzes zeigen sich zwischen den untersuchten Kombinationen der Ansatzfunktion nahezu keine Unterschiede. Alle Kombinationen weisen hohe Bestimmtheitsmaße auf.

Tabelle 22: Übersicht der ermittelten Bestimmtheitsmaße für Fall 2a).

Modell	B	CL	CQ	D	H	Gesamt
Johnson & Cook (1983)	0,935	0,938	0,915	0,924	0,930	0,928
Huh & Kang (2002)	0,964	0,953	0,938	0,950	0,964	0,954
Cowper & Symonds (1957)	0,972	0,988	0,974	0,987	0,966	0,977
Swift 1.1.1	0,993	0,991	0,998	0,996	0,989	0,993
Swift 2.2.2	0,991	0,995	0,999	0,994	0,988	0,993
Swift 2.3.3	0,991	0,995	0,998	0,995	0,990	0,994
Hollomon 1.1	0,988	0,994	0,998	0,995	0,987	0,992
Hollomon 2.2	0,992	0,996	0,999	0,994	0,992	0,994

Fall 2b) $\varepsilon_{w,pl} \leq A_{Gl}$ & Dehnratenbereiche I und II

Bei Betrachtung der für Fall 2b) ermittelten Bestimmtheitsmaße (siehe Tabelle 23) fallen die Modelle nach Johnson & Cook, Huh & Kang und Cowper & Symonds deutlich heraus. Bei der Approximation der Fließkurve bis zur Gleichmaßdehnung für den gesamten untersuchten Dehnratenbereich können erwartungsgemäß für die Beurteilung der Approximationsgüte die für die zuvor betrachteten Fälle 1a) bis 2a) genannten Argumente angeführt werden. So unterschätzen die Modelle Johnson & Cook und Huh & Kang die Dehnratenverfestigung der unteren Streckgrenze insbesondere in Dehnratenbereich II. Zudem kann für das Modell nach Johnson & Cook befunden werden, dass für Dehnraten, die deutlich von der Referenzdehnrate abweichen, der dehnratenabhängige Spannungsanstieg deutlich unterschätzt wird. Dagegen zeigt das Modell nach Huh & Kang bei besonders großen plastischen Verformungen aufgrund des zusätzlichen quadratisch-logarithmischen Terms eine Überschätzung der Dehnratenverfestigung.

Die für das Modell nach Cowper & Symonds ermittelten vergleichsweise niedrigen Bestimmtheitsmaße können auf die im Bereich niedriger Verformungen und hoher Dehnraten auftretenden teils deutlichen Abweichungen zwischen Mess- und Modellwert zurückgeführt werden. Dies wiederum ist auf die zugrundeliegende mathematische Formulierung sowie die Auslegung als „overstress“-Modell zurückzuführen. Demnach wird eine Referenz-Fließkurve dehnratenabhängig skaliert, wobei der Skalierfaktor lediglich für ein festzulegendes Verformungsniveau approximiert werden kann.

Tabelle 23: Übersicht der ermittelten Bestimmtheitsmaße für Fall 2b).

Modell	B	CL	CQ	D	H	Gesamt
Johnson & Cook (1983)	0,709	0,828	0,780	0,836	0,688	0,768
Huh & Kang (2002)	0,840	0,881	0,898	0,890	0,822	0,866
Cowper & Symonds (1957)	0,732	0,773	0,795	0,805	0,746	0,770
Swift 1.1.1	0,950	0,973	0,992	0,986	0,954	0,971
Swift 2.2.2	0,957	0,973	0,991	0,985	0,954	0,972
Swift 2.3.3	0,954	0,979	0,991	0,983	0,955	0,972
Hollomon 1.1	0,948	0,977	0,990	0,976	0,948	0,968
Hollomon 2.2	0,946	0,979	0,991	0,983	0,953	0,970

Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell zeigt in allen untersuchten Varianten eine ähnlich hohe Approximationsgüte. Die resultierenden Bestimmtheitsmaße weisen Werte größer 0,968 auf, was einer guten Übereinstimmung entspricht. Obwohl das Modell auf Basis des Swift-Ansatzes leicht bessere Ergebnisse aufweist, wird in dieser Arbeit für die Modellierung der Fließkurve bis zur Gleichmaßdehnung und für beide Dehnratenbereiche das Modell auf Basis des Hollomon-Ansatzes empfohlen. Dies wird mit der geringeren Anzahl der zu approximierenden Parameter begründet. Bei der Approximation der Modellparameter zeigt sich, dass die verwendeten LN-Funktionen der Kombination Hollomon 2.2 deutlich unempfindlicher gegenüber schlecht gewählten Anfangswerten sind, als die für die Kombination Hollomon 1.1 verwendeten Potenzfunktionen.

5 Abschließende Bemerkungen

5.1 Zusammenfassung

5.1.1 Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit

Zur Untersuchung der dehnratenabhängigen Beeinflussung der Festigkeits- und Verformungskennwerte von Baustahl sind in dieser Arbeit neben quasistatischen Standard-Zugversuchen auch zahlreiche Hochgeschwindigkeitszugversuche unter Variation der Beanspruchungsgeschwindigkeit durchgeführt worden. Die Werkstoffauswahl sieht hauptsächlich die Untersuchung des im Stahlhochbau weit verbreiteten Baustahls S355J2+N anhand von drei Chargen vor, die sich vor allem hinsichtlich der Kerbschlagarbeit, der Festigkeitskennwerte und des mittleren Korndurchmessers unterscheiden. Zur Untersuchung des Einflusses der Wärmebehandlung ist zudem ein thermomechanisch gewalzter Baustahl S355ML in das Versuchsprogramm aufgenommen worden.

Generell kann die positive Dehnratenempfindlichkeit der unteren Streckgrenze bestätigt werden. Der Verlauf der unteren Streckgrenze über die wahre plastische Dehnrate folgt dabei jedoch nicht einer linear-logarithmischen Beziehung. Insbesondere in Dehnratenbereich II ist von einem überproportionalen Anstieg der wahren Spannung über den Logarithmus der wahren plastischen Dehnrate auszugehen. Für die in dieser Arbeit untersuchten Baustähle nimmt die Dehnratenempfindlichkeit mit zunehmendem Verformungsniveau ab. Die Entwicklung der Festigkeitswerte über die wahre plastische Dehnrate ändert von einem deutlich überproportionalen Anstieg bei der unteren Streckgrenze zu einer annähernd linear-logarithmischen Beziehung bei der Zugfestigkeit. Die Dehnratenverfestigung der untersuchten Baustähle ist in Dehnratenbereich I nahezu identisch. Unterschiede zwischen den einzelnen Chargen Baustahl S355J2+N sowie zwischen den Herstellungsverfahren im Vergleich der Materialien CL und H zeigen sich erst in Dehnratenbereich II. Dabei nimmt die Dehnratenverfestigung entsprechend der bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelten unteren Streckgrenze von Material B über Material C und Material D zu Material H zu. Dies entspricht auch der Abstufung des mittleren Ferritkorndurchmessers sowie der ermittelten Arbeitswerte der Baustähle. Hinsichtlich der Probenlage in Bezug zur Walzrichtung konnte anhand der

Untersuchung von Material C keine unterschiedliche Dehnratenverfestigung ermittelt werden. Infolge der unterschiedlichen Dehnratenempfindlichkeiten von Streckgrenze und Zugfestigkeit nimmt die Differenz zwischen beiden Werten mit zunehmender Beanspruchungsgeschwindigkeit ab, während das Streckgrenzenverhältnis R_{eL}/R_m zunimmt. Die Verfestigung nimmt bei Dehnraterhöhung zunächst leicht zu und fällt dann bei starker Zunahme der Streuung wieder leicht ab. Es kann jedoch nicht ohne weitere Untersuchungen angegeben werden, zu welchen Teilen die Beeinflussung der Verfestigung durch die gegenläufigen Effekte der einsetzenden thermischen Entfestigung und der Dehnratenverfestigung stattfindet. Es kann jedoch angenommen werden, dass der Effekt der Dehnratenverfestigung bis in den mittleren Dehnratenbereich überwiegt und erst bei Dehnraten $\dot{\epsilon}_{pl} > 10/s$ der gegenläufige Effekt der thermischen Entfestigung maßgebend wird.

Für die untersuchten Baustähle konnte gezeigt werden, dass die Lüdersdehnung überproportional über die wahre plastische Dehnraten ansteigt und somit qualitativ der Entwicklung der unteren Streckgrenze entspricht. Bei dem thermomechanisch gewalzten Baustahl, Material H, zeigte sich in Dehnratenbereich II entsprechend der vergleichsweise niedrigen Dehnratenverfestigung lediglich ein geringer Anstieg der Lüdersdehnung. Bei Darstellung der Lüdersdehnung über die untere Streckgrenze lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Kennwerten erkennen. Dagegen konnte für alle untersuchten Werkstoffe gezeigt werden, dass die Gleichmaßdehnung bei einer Dehnraterhöhung in einer annähernd linear-logarithmischen Beziehung abnimmt. Die ermittelten Verläufe der Gleichmaßdehnung entsprechen somit qualitativ den umgekehrten Entwicklungen der Zugfestigkeiten. Hinsichtlich der Bruchdehnung kann befunden werden, dass die Werte für alle untersuchten Werkstoffe bei Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit zunehmen, wobei die beobachtete Streuung der Messwerte im Vergleich zu der Lüdersdehnung und der Gleichmaßdehnung deutlich größer ist. Dabei ist es auch bei Betrachtung der Mittelwerte nicht möglich, zu befinden, ob die Bruchdehnung proportional oder überproportional über die logarithmisch aufgetragene Dehnraten ansteigt.

5.1.2 Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit

Die Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit wurde in dieser Arbeit anhand der unteren Streckgrenze untersucht. Als zu untersuchende Werkstoffeigenschaften wurden zum einen als charakteristische Werkstoffkennwerte die quasistatische untere

Streckgrenze als Indikator der Festigkeit, der mittlere Ferritkorndurchmesser, der als maßgebende Gefügekenngroße angesehen wird und das Streckgrenzenverhältnis, als Maß der Verfestigung, untersucht. Zum anderen wurde die Kerbschlagarbeit als integraler materialspezifischer Kennwert untersucht, der für eine Vielzahl materialspezifischer Eigenschaften steht, die wiederum als beeinflussende Parameter gelten.

Es konnte gezeigt werden, dass die Dehnratenempfindlichkeit als nicht konstant über den gesamten untersuchten Dehnratenbereich angenommen werden kann. So weisen alle untersuchten Baustähle in Dehnratenbereich I, also bei Dehnraten bis $\dot{\epsilon}_{pl} = 10/s$, deutlich niedrigere Dehnratenempfindlichkeiten als in Dehnratenbereich II. Die für die in dieser Arbeit untersuchten Baustähle ermittelten Werte der Dehnratenempfindlichkeit lassen sich in einer annähernd linearen Beziehung zum mittleren Ferritkorndurchmesser darstellen. Bei einer Darstellung über die quasistatische untere Streckgrenze ergibt sich ein Verlauf, der der Hall-Petch-Beziehung entspricht. Es kann somit befunden werden, dass die Dehnratenempfindlichkeit mit Zunahme der quasistatischen unteren Streckgrenze und mit abnehmendem mittlerem Ferritkorndurchmesser abnimmt. Daraus lässt sich schließen, dass weitere beeinflussende Parameter der quasistatischen unteren Streckgrenze, wie bspw. der Kohlenstoffgehalt, bzw. der Anteil bestimmter Legierungselemente, für die in dieser Arbeit untersuchten Baustähle keinen wesentlichen Einfluss auf die Dehnratenempfindlichkeit ausüben, sondern diese maßgeblich durch die Korngröße gesteuert wird.

Für die in dieser Arbeit untersuchten Baustähle konnte gezeigt werden, dass die Dehnratenempfindlichkeit mit Zunahme der Kerbschlagarbeit abnimmt. Die Entwicklung entspricht qualitativ dem Verlauf der Dehnratenempfindlichkeit bei Darstellung über die quasistatische untere Streckgrenze und kann somit ebenfalls auf den mittleren Ferritkorndurchmesser zurückgeführt werden. Entsprechend der Korngrenzenverfestigung erhöht sich mit zunehmend feinerem Korn die Korngrenzenanzahl. Dies führt gleichermaßen zu einem Anstieg der Festigkeit und der Zähigkeit, bzw. zu einer Zunahme der Kerbschlagarbeit. So weist Material H infolge des thermomechanischen Herstellverfahrens von allen untersuchten Baustählen die größte Zähigkeit und dementsprechend die niedrigste Dehnratenempfindlichkeit auf. Entsprechend der Arbeitswerte steigt die Dehnratenempfindlichkeit von Material B über Material C und Material D zu Material H an.

Es zeigte sich, dass der Verlauf der Dehnratenempfindlichkeit über das Streckgrenzenverhältnis für die in dieser Arbeit untersuchten Baustähle einer Entwicklung folgt, die metallphysikalisch nicht erklärt werden kann. Ebenso wie die Kerbschlagarbeit wird das Streckgrenzenverhältnis üblicherweise als Maß für das plastische Verformungsvermögen des Werkstoffs bis zum Eintritt des Bruchs gesehen. Da die Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit bei einer Zunahme der Kerbschlagarbeit einen abfallenden Verlauf aufweist, sollte sich bei einer Zunahme des Streckgrenzenverhältnisses ein ansteigender Verlauf der Dehnratenempfindlichkeit einstellen, was anhand der in dieser Arbeit ermittelten Versuchsdaten nicht beobachtet wurde. Insofern ist zu vermuten, dass eine Darstellung der Dehnratenempfindlichkeit allein über das Streckgrenzenverhältnis als Maß für die Zähigkeit nicht zwingend sinnvoll gedeutet werden kann.

Als einfaches Hilfsmittel und für eine grobe Einschätzung der zu erwartenden dehnratenabhängigen Veränderung der unteren Streckgrenze auch ohne die Durchführung von experimentellen Untersuchungen wurde ein Ingenieurmodell entwickelt. Die dehnratenabhängige Erhöhung der unteren Streckgrenze erfolgt dabei in Abhängigkeit der quasistatischen unteren Streckgrenze $R_{eL,qs}$ oder der Kerbschlagarbeit $KV(-20^{\circ}C)$ und somit anhand von Werten, die im Rahmen eines üblicherweise vorhandenen Abnahmeprüfzeugnisses gegeben sind.

5.1.3 Modellbildung

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl Festigkeits- als auch Verformungskennwerte der Baustähle teilweise signifikant dehnratenabhängig sind. Dies führt dazu, dass die Fließkurvenform und -lage durch die Beanspruchungsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Zur Findung eines geeigneten Materialmodells, welches das dehnratenabhängige Werkstoffverhalten der untersuchten Baustähle abbildet, wurden zunächst die Modelle nach Johnson & Cook, Huh & Kang und Cowper & Symonds zur Beschreibung der Fließkurve untersucht.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Dehnratenverfestigung für niedrige Verformungsniveaus überproportional zunimmt und mit zunehmender plastischer Verformung in einen annähernd linear-logarithmischen Verlauf übergeht. Die untersuchten Modelle gehen einem multiplikativen Ansatz nach, der die Dehnratenverfestigung anhand eines Skalierungsfaktors berücksichtigt. Dieser wird jedoch

lediglich in Abhängigkeit von der betrachteten wahren plastischen Dehnrates bestimmt und ist somit unabhängig von dem betrachteten Verformungsniveau. Dies führt dazu, dass die bestehenden Modelle lediglich für bestimmte Teile des untersuchten Dehnratenbereiches bzw. lediglich für bestimmte Verformungsniveaus an die Versuchsdaten angepasst werden können. Die Ermittlung eines Parametersatzes, mit der eine hohe Approximationsgüte für alle Dehnraten und alle Verformungsniveaus erreicht wird, war für keines der bestehenden Modelle möglich.

Die Fließkurve nähert sich bei Zunahme der wahren plastischen Dehnrates einem höheren Spannungsniveau an. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße haben jedoch gezeigt, dass eine reine Skalierung der Fließkurve für die in dieser Arbeit untersuchten Werkstoffe zu einer vergleichsweise niedrigen Approximationsgüte führt. Dies kann auf die durch die Modelle nicht berücksichtigte dehnratenabhängige Formänderung der Fließkurve zurückgeführt werden.

In dieser Arbeit wurde ein neues Materialmodell vorgestellt und in einer Variantenuntersuchung für die untersuchten Werkstoffe optimiert. Das Modell verfolgt den Ansatz der Trennung und getrennten Approximation von Fließplateau und Verfestigungskurve bis zur Gleichmaßdehnung mithilfe verschiedener Ansatzfunktionen. Durch die getrennte Beschreibung der Fließkurve in einer Maximalfunktion kann das Fließplateau berücksichtigt werden. Für die Beschreibung der Verfestigungskurve wurden bekannte Verfestigungsmodelle verwendet, deren Modellparameter hinsichtlich ihrer Dehnratenabhängigkeit untersucht und wiederum mithilfe von Ansatzfunktionen approximiert wurden. Dies ermöglicht es, das Verfestigungsverhalten in Abhängigkeit der Dehnrates darzustellen. Umgekehrt wird die Dehnratesverfestigung des Baustahls in Abhängigkeit des betrachteten Verformungsniveaus beschrieben.

Die untersuchten Baustähle weisen teilweise unterschiedliche Dehnratesempfindlichkeiten der Festigkeits- und Verformungskennwerte auf. Abgesehen von der Anpassung der jeweiligen Modellparameter muss hinsichtlich der mathematischen Formulierungen dennoch nicht zwischen den einzelnen Baustählen unterschieden werden.

5.2 Ausblick

Für weitere Untersuchungen kann auf Materialebene die Ausweitung des bisherigen Kenntnisstands zum dehnratenabhängigen Werkstoffverhalten auf weitere Baustähle empfohlen werden. Der Baustahl S235JR+AR wird neben dem in dieser Arbeit hauptsächlich untersuchten Baustahl S355J2+N üblicherweise als Massenhohlblech bezeichnet und ist dementsprechend als Stahl ohne besondere Anforderungen weit verbreitet. Die Untersuchung eines S235JR+AR wäre somit von baupraktischer Relevanz. Zudem würde dies den untersuchten Parameterbereich zu größeren mittleren Ferritkorndurchmessern und niedrigeren Festigkeiten erweitern, was eine im Vergleich zu den in dieser Arbeit untersuchten Baustählen größere Dehnratenempfindlichkeit vermuten lässt. Die in Abschnitt 4.2.4 gezeigten Erkenntnisse zeigen, dass eine Extrapolation der für die in dieser Arbeit ermittelten Dehnratenempfindlichkeiten zu niedrigeren Festigkeiten und entsprechend höheren m_e -Werten nicht ohne weiteres möglich ist. In Verbindung mit einer Untersuchung von Baustählen mit vergleichsweise feinerem Korn und höherer Festigkeit, wie beispielsweise S460N, S460ML und S690ML, könnte dies Aufschluss darüber geben, inwieweit sich die in den Abschnitten 4.1 und 4.2 gewonnenen Erkenntnisse auf das gesamte Spektrum möglicher Korngrößen und Festigkeiten von Baustählen übertragen lassen.

Es hat sich gezeigt, dass die zwischen den Probenwerkstoffen auftretenden Unterschiede im dehnratenabhängigen Werkstoffverhalten und insbesondere hinsichtlich der Dehnratenempfindlichkeit zum größten Teil auf die jeweilige bei quasistatischer Beanspruchungsgeschwindigkeit ermittelte untere Streckgrenze und letztlich auf den mittleren Ferritkorndurchmesser zurückgeführt werden können. Eine isolierte Untersuchung der Beeinflussung der Dehnratenempfindlichkeit durch die Korngröße ist jedoch wie in Abschnitt 4.2.1 dargestellt wurde schwierig. Durch das gezielte Einstellen des mittleren Korndurchmessers durch eine eigene nachträgliche Wärmebehandlung, evtl. durch Kornfeinung und Grobkornglühen, könnte eine Untersuchung des Einflusses des mittleren Korndurchmessers innerhalb einer Charge und somit ohne den Einfluss unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen durchgeführt werden.

Die Durchführung von geeigneten Validierungsversuchen, wie bspw. Kerbzugversuchen mit milder Kerbgeometrie, instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen oder Bauteilversuchen bei erhöhten Beanspruchungsgeschwindigkeiten, steht noch aus.

Baupraktisch relevant dürften zudem zweistufige Stützenversuche unter Anprall-/Explosionsbelastung sein, insbesondere hinsichtlich der Bestimmung bleibender Verformungen und der Resttragfähigkeit. Anhand der numerischen Simulation der durchgeführten Versuche sollte das in dieser Arbeit entwickelte Materialmodell schließlich validiert werden. Es ist zu beachten, dass das in dieser Arbeit vorgestellte Modell die dehnratenabhängige Form- und Lageveränderung der Fließkurve lediglich bis zur Gleichmaßdehnung beschreibt. Die dehnratenabhängige Beschreibung der Fließkurve bis zum Versagen der Probe oder des Versuchskörpers setzt die Kenntnis des Schädigungs-/Versagensverhaltens des Stahls voraus. Die hierzu notwendige Untersuchung des Einflusses der Spannungsmehrachsigkeit sowie die Bestimmung charakteristischer Versagens- und Fließortkurven unter Berücksichtigung der Beanspruchungsgeschwindigkeit anhand geeigneter Versuche werden empfohlen. Für die schädigungsmechanische Modellierung sollten im Anschluss zunächst bestehende Schädigungsmodelle untersucht und gegebenenfalls für Baustahl modifiziert werden.

Auch die Klärung der Frage, welche wahren plastischen Dehnraten lokal am Bauteil auftreten, wie diese am Bauteil verteilt sind und wie die zeitliche Entwicklung der Dehnratenverteilung aussieht, dürfte baupraktisch relevant sein. In der Literatur ist hier eine Verallgemeinerung zu beobachten, nach der für das Bauwesen je nach Beanspruchungssituation nur sehr grob relevante Dehnraten angegeben werden, die teils unrealistisch erscheinen.

6 Literatur

- [1] *Hopkinson, J.*: On the rupture of iron wire by a blow. Proc. Lit. Phil. Soc. Manchester 2 (1872).
- [2] *Ludwik, P.*: Über den Einfluß der Deformationsgeschwindigkeit bei bleibenden Deformationen mit besonderer Berücksichtigung der Nachwirkungserscheinungen. Physikalische Zeitschrift (1909), S. 411–417.
- [3] *Cowper, G. R., Symonds, P. S.*: Strain-Hardening and Strain-Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams. Technical Report 28, 1957.
- [4] *Johnson, G. R., Cook, W. H.*: A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures. Proc. of the 7th Int. Symposium on Ballistics - 1983, The Hague (1983), S. 541–547.
- [5] *Weißhaupt, H. P.*: Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe bei hohen Dehngeschwindigkeiten. Dissertation. Aachen, 1995.
- [6] *Belche, P.*: Einfluß von Prüftemperatur und Dehngeschwindigkeit auf das Fließverhalten von Stählen mit besonderer Berücksichtigung des Werkstoffverhaltens bei statischer Beanspruchung. Dissertation. Aachen, 1983.
- [7] *Soliman, S. A.*: Einfluss der Prüftemperatur und der Dehngeschwindigkeit auf die mechanischen Kennwerte hochfester Baustähle in unterschiedlichen Wärmebehandlungszuständen. Dissertation. Aachen, 1981.
- [8] *Rees, H.*: Der Einfluss von Prüftemperatur, Verformungsgeschwindigkeit und Ferritkorngröße auf die Spannungs-Dehnungskurve von Stählen mit besonderer Berücksichtigung des Verfestigungsverhaltens im Bereich der Einschnürdehnung. Dissertation. Düsseldorf: Verlag Stahleisen m.b.H., 1976.
- [9] *Krabiell, A.*: Zum Einfluss von Temperatur und Dehngeschwindigkeit auf die Zähigkeitskennwerte von Baustählen mit unterschiedlicher Festigkeit. Dissertation. Aachen, 1982.
- [10] *Kühn, B.*: Vereinheitlichung der europäischen Regelung zur Vermeidung von Sprödbruch. Dissertation. Aachen, 2005.
- [11] *Tanimura, S., Mimura, K., Zhu, W. H.*: Practical Constitutive Models Covering Wide Ranges of Strain Rates, Strains and Temperature. Key Engineering Materials 177-180 (2000), S. 189–200.

-
- [12] *Larour, P.*: Strain rate sensitivity of automotive sheet steels: influence of plastic strain, strain rate, temperature, microstructure, bake hardening and pre-strain. Dissertation. Aachen, 2010.
- [13] *DIN EN 10025-2*: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [14] *DIN EN 10025-4*: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 4: Technische Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [15] *Langseth, M., Lindholm, U. S., Larsen, P. K., Lian, B.*: Strain-Rate Sensitivity of Mild Steel Grade St 52-3N. *Journal of Engineering Mechanics* (1991), S. 719–732.
- [16] *Böttcher, C.*: Geschwindigkeitssensitivität des mechanischen Verhaltens unlegierter Baustähle bei wiederholter Beanspruchung bis in den inelastischen Bereich - experimentelle Untersuchung und Modellierung. Dissertation. Braunschweig, 2002.
- [17] *SEP 1230*: Ermittlung mechanischer Eigenschaften an Blechwerkstoffen bei hohen Dehnraten im Hochgeschwindigkeitsdehnversuch: STAHL-EISEN-Prüfblätter des Stahlinstituts VDEh.
- [18] *Böhme, W., Luke, M., Blauel, J. G., Sun, D.-Z., Rohr, I., Harwick, W.*: FAT-Richtlinie - Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation. FAT - Schriftenreihe Nr. 211, 2007.
- [19] *ESIS P7-00*: Procedure for Dynamic Tensile Tests.
- [20] *DIN EN ISO 26203-2*: Metallische Werkstoffe - Zugversuch bei hohen Dehngeschwindigkeiten - Teil 2: Servohydraulische und andere Systeme: DIN Deutsches Institut für Normung e.V (2011).
- [21] *Stark-Seuken, D.*: Ermittlung und Beschreibung der Fließkurven von Karosseriewerkstoffen bei hohen Dehnraten. Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde, Band 9/2001. Dissertation. Aachen, 2001.
- [22] *Brüninghaus, K.*: Zum Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit auf das Verhalten von Stählen bei stabiler Rissverlängerung. Dissertation. Aachen: VDI Verlag, 1988.
- [23] *Hosten, A.*: Numerische Modellierung dynamischer Belastungen von Stählen. Dissertation. Aachen, 2014.
- [24] *Lee, W. S., Lam, H. F.*: The deformation behaviour and microstructure evolution of high-strength alloy steel at high rate of strain. *Journal of Materials Processing Technology* 57 (1996), S. 233–240.

-
- [25] *Falk, J.*: Untersuchungen zum Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das Verformungs- u. Bruchverhalten von Stählen unterschiedlicher Festigkeit u. Zähigkeit. Dissertation. Aachen, 1993.
- [26] *El-Magd, E., Scholles, H., Weisshaupt, H.*: Influence of strain rate on the stress-strain curve in the range of Lüders strain. *Steel Research* 67 (1996), S. 495–500.
- [27] *van Rooyen, G. T.*: The stress and strain distribution in a propagating Lüders front accompanying the yield-point phenomenon in iron. *Materials Science and Engineering* 3 (1968), S. 105–117.
- [28] *Gottstein, G.*: Physikalische Grundlagen der Materialkunde. Mit 28 Tabellen. Berlin [u.a.]: Springer, 2007.
- [29] *Forni, D., Chiaia, B., Cadoni, E.*: Strain rate behaviour in tension of S355 steel. Base for progressive collapse analysis. *Engineering Structures* 119 (2016), S. 164–173.
- [30] *DIN EN ISO 6892-1*: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [31] *Lee, W. S., Yeh, G. W.*: The plastic deformation behaviour of AISI 4340 alloy steel subjected to high temperature and high strain rate loading conditions. *Journal of Materials Processing Technology* 71 (1997), S. 224–234.
- [32] *Herzig, N.*: Erfassung und Beschreibung des skalierten Fließ-, Verfestigungs- und Versagensverhaltens ausgewählter metallischer Werkstoffe. Dissertation, 2008.
- [33] *Bruce, D. M.*: Dynamic Tensile Testing of Sheet Steels and Influence of Strain Rate on Strengthening Mechanisms in Sheet Steels. Dissertation. Colorado, 2003.
- [34] *Weber, H.*: Einfluß erhöhter Dehngeschwindigkeit auf das Spannung-Dehnungsverhalten ferritischer und austenitischer Stähle unter Berücksichtigung elastisch-plastischer Wellenausbreitung. Aachen, 1968.
- [35] *Hall, E. O.*: The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. *Proceedings of the Physical Society. Section B* 64 (1951), S. 747.
- [36] *Petch, N. J.*: The Cleavage Strength of Polycrystals. *Journal of the Iron and Steel Institute* 173 (1953), S. 25–28.
- [37] *Campbell, J. D., Harding, J.*: The effect of grain size, rate of strain, and neutron irradiation on the tensile strength of alpha-iron. *Response of metals to high velocity deformation, Proc. Conf. Colorado* (1960), S. 51–75.
- [38] *Tsuchida, N., Masuda, H., Harada, Y., Fukaura, K., Tomota, Y., Nagai, K.*: Effect of ferrite grain size on tensile deformation behavior of a ferrite-cementite low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A* 488 (2008), S. 446–452.

-
- [39] *Kang, W. J., Cho, S., Huh, H., Chung, D. T.*: Modified Johnson-Cook model for vehicle body crashworthiness simulation. *International Journal of Vehicle Design* 21 (1999), S. 424.
- [40] *Couque, H.*: The use of the direct impact Hopkinson pressure bar technique to describe thermally activated and viscous regimes of metallic materials. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 372 (2014), S. 20130218.
- [41] *Hollomon, J. H.*: Tensile Deformation. *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 168 (1945), S. 268–275.
- [42] *Swift, H. W.*: Plastic Instability under Plane Stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (1952), S. 1–18.
- [43] *Truesdell, C., Toupin, R.*: The Classical Field Theories. In: *Flügge, S. (Hg.): Handbuch der Physik. Encyclopedia of physics. Berlin [etc.]: Springer*, S. 226–858.
- [44] *Rohr, I.*: Integrale Charakterisierung und Modellierung von duktilem Stahl unter dynamischen Lasten. Dissertation. Aachen, 2003.
- [45] *Rule, W. K., Jones, S. E.*: A Revised Form for the Johnson-Cook Strength Model. *International Journal of Impact Engineering* 21 (1998), S. 609–624.
- [46] *Huh, H., Kang, W. J.*: Crash-worthiness assessment of thin-walled structures with the high-strength sheet steel. *Int. J. of Vehicle Design* (2002), S. 1–21.
- [47] *Rösler, J., Harders, H., Bäker, M.*: *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [48] *Ehinger, D., Krüger, L.*: Dynamische Werkstoffprüfung. In: *Biermann, H., Krüger, L. (Hg.): Moderne Methoden der Werkstoffprüfung*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [49] *Friedel, J.*: *Dislocations*. Oxford, New York: Pergamon Press; [U.S.A. ed. distributed by Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass.], 1964.
- [50] *Macherauch, E., Vöhringer, O.*: Das Verhalten metallischer Werkstoffe unter mechanischer Beanspruchung. *Mitteilungen aus dem Institut für Werkstoffkunde I der Universität Karlsruhe (TH). Z. Werkstofftech.* (1978), S. 370–391.
- [51] *Conrad, H.*: Thermally activated deformation of metals. *JOM* 16 (1964), S. 582–588.
- [52] *Hesse, W.*: Zur Auswirkung hoher Beanspruchungsgeschwindigkeiten auf das Versagensverhalten von Baustählen unter einseitiger Zugbeanspruchung. Dissertation. Aachen, 1986.
- [53] *Dahl, W., Belche, P.*: Kennzeichnung des Stahls durch die statische Streckgrenze bei Verwendung im Hochbau. Bericht SO4. Forschungsbericht des Instituts für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen (1982).

-
- [54] *DIN EN ISO 643*: Stahl - Mikrophotographische Bestimmung der erkennbaren Korngröße: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [55] *ASTM E112*: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size: ASTM International.
- [56] *DIN EN ISO 148-1*: Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy - Teil 1: Prüfverfahren.
- [57] *DIN EN ISO 26203-1*: Metallische Werkstoffe - Zugversuch bei hohen Dehngeschwindigkeiten - Teil 1: Elastische Stoßwellentechnik: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [58] *König, L.*: Beitrag zur Ermittlung des dehnratenabhängigen Werkstoffverhaltens im servohydraulischen Schnellzerreißversuch. Dissertation, 2007.
- [59] *Böhme, W., Borsutzki, M., Düpmeier, T., Häcker, R., Larour, P., Mayer, U., St. Geisler*: Ergebnisse eines VDEh-Ringversuchs zum Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1230 „Hochgeschwindigkeitszugversuche“. Berlin, 2005.
- [60] *Böhme, W.*: FAT-Richtlinie „Dynamische Werkstoffkennwerte für die Crashsimulation“. Materials Testing 50 (2008), S. 199–205.
- [61] *Dahl, W., Krabiell, A.*: Stähle mit erhöhter Streckgrenze für dickwandige Druckbehälter - Teil II. Abschlussbericht, 1979.

Anhang

A.1 Übersicht der ermittelten Parametersätze

Tabelle A.1: Parametersätze für die Modelle nach Johnson & Cook und Huh & Kang.

Material	A	B	n	C	C ₁	C ₂
	[N/mm]	[N/mm]	[-]	[-]	[-]	[-]
B	434,9	1638,7	0,891	0,0263	0,0326	0,0024
CL	444,0	1834,2	0,924	0,0197	0,0232	0,0013
CQ	449,1	1711,6	0,939	0,0181	0,0253	0,0020
D	462,9	1731,9	0,935	0,0204	0,0230	0,0013
H	499,7	1229,4	0,999	0,0223	0,0272	0,0018

Tabelle A.2: Parametersätze für das Modell nach Cowper & Symonds.

Material	C	p
	[1/s]	[-]
B	0,2799	18,64
CL	0,0253	35,93
CQ	0,1944	26,66
D	0,0100	39,06
H	0,1436	24,24

Tabelle A.3: Parametersätze für das Modell nach Kühn.

	m _{Kühn}	m _{Fit}
Material	[-]	[-]
B	3,27	2,59
CL	3,27	2,71
CQ	3,27	2,77
D	3,27	2,80
H	3,27	2,97

Tabelle A.4: Parametersätze für den Potenz- und den LN-Ansatz nach Gleichung (4.10) und Gleichung (4.11) zur dehnratenabhängigen Beschreibung der unteren Streckgrenze.

Material	Potenzansatz			LN-Ansatz		
	ra	rb	rc	ra	rb	rc
B	383,09	40,04	0,39	445,10	1,27	11,06
CL	373,80	70,09	0,25	466,00	0,57	12,62
CQ	383,91	72,07	0,24	467,73	0,70	10,88
D	386,47	90,19	0,19	495,78	0,28	13,15
H	436,11	53,74	0,27	503,63	0,80	9,81

Tabelle A.5: Parametersätze für die untersuchten Swift- und Hollomon-Kombinationen zur dehnratenabhängigen Beschreibung des Verfestigungsbereiches. Material B - S355J2+N.

Material B S355J2+N		Swift 1.1.1	Swift 2.2.2	Swift 2.3.3	Hollomon 1.1	Hollomon 2.2
A	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.15)	(4.14)	(4.15)
	aa	809,00	407,53	1089,01	934,00	934,00
	ab	166,74	12,80	0,018	102,40	102,40
	ac	0,089	-88,475	10,378	0,172	0,172
B	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	(4.14)	(4.15)
	ba	-0,00925	1,077	0,022	0,213	0,213
	bb	-2,68E-04	-8,44E-03	-2,98E-04	-7,68E-04	-7,68E-04
	bc	0,745	0,070	3,30E-07	0,854	0,854
C	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	-	-
	ca	0,175	2,672	0,257	-	-
	cb	-1,28E-03	-2,03E-02	-1,53E-03	-	-
	cc	0,78563	0,16266	5,50E-06	-	-

Tabelle A.6: Parametersätze für die untersuchten Swift- und Hollomon-Kombinationen zur dehnratenabhängigen Beschreibung des Verfestigungsbereiches. Material CL - S355J2+N.

Material CL S355J2+N		Swift 1.1.1	Swift 2.2.2	Swift 2.3.3	Hollomon 1.1	Hollomon 2.2
A	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.15)	(4.14)	(4.15)
	aa	895,27	977,70	1063,88	1196,00	1113,99
	ab	61,33	0,46	0,129	-153,50	-1,70
	ac	0,251	11,010	11,892	-0,051	25,692
B	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	(4.14)	(4.15)
	ba	-0,01000	-0,010	0,000	0,207	0,222
	bb	2,58E-04	1,67E-04	2,39E-04	-4,85E-03	-8,11E-04
	bc	0,924	0,000	-7,20E-07	0,453	0,005
C	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	-	-
	ca	0,164	0,163	0,206	-	-
	cb	5,60E-05	1,86E-04	-5,57E-06	-	-
	cc	1,20000	-0,00017	-2,70E-07	-	-

Tabelle A.7: Parametersätze für die untersuchten Swift- und Hollomon-Kombinationen zur dehnratenabhängigen Beschreibung des Verfestigungsbereiches. Material CQ - S355J2+N.

Material CQ S355J2+N		Swift 1.1.1	Swift 2.2.2	Swift 2.3.3	Hollomon 1.1	Hollomon 2.2
A	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.15)	(4.14)	(4.15)
	aa	824,26	1093,78	982,36	984,73	1036,53
	ab	257,16	0,76	2,461	3,36	0,12
	ac	0,164	30,999	7,547	0,752	14,910
B	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	(4.14)	(4.15)
	ba	-0,00453	0,013	-0,009	0,904	0,201
	bb	6,59E-03	3,01E-04	8,02E-04	-7,19E-01	-2,95E-04
	bc	0,573	0,004	-2,15E-06	0,004	0,002
C	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	-	-
	ca	0,160	0,238	0,174	-	-
	cb	6,12E-02	2,23E-04	1,16E-03	-	-
	cc	0,27062	0,01341	-8,00E-07	-	-

Tabelle A.8: Parametersätze für die untersuchten Swift- und Hollomon-Kombinationen zur dehnratenabhängigen Beschreibung des Verfestigungsbereiches. Material D - S355J2+N.

Material D S355J2+N		Swift 1.1.1	Swift 2.2.2	Swift 2.3.3	Hollomon 1.1	Hollomon 2.2
A	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.15)	(4.14)	(4.15)
	aa	806,18	1360,44	999,89	905,54	1025,46
	ab	211,23	-0,57	3,430	140,57	1,55
	ac	0,085	9,496	13,442	0,211	8,026
B	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	(4.14)	(4.15)
	ba	-0,01392	0,133	-0,013	0,185	0,180
	bb	-1,71E-08	-2,29E-04	4,30E-04	6,79E-03	4,41E-04
	bc	2,420	-0,015	-4,80E-08	0,407	-0,003
C	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	-	-
	ca	0,166	0,484	0,161	-	-
	cb	-1,91E-05	-4,00E-04	1,32E-03	-	-
	cc	1,18236	-0,03151	1,06E-06	-	-

Tabelle A.9: Parametersätze für die untersuchten Swift- und Hollomon-Kombinationen zur dehnratenabhängigen Beschreibung des Verfestigungsbereiches. Material H - S355ML.

Material H S355ML		Swift 1.1.1	Swift 2.2.2	Swift 2.3.3	Hollomon 1.1	Hollomon 2.2
A	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.15)	(4.14)	(4.15)
	aa	1181,92	396,19	994,22	883,10	903,71
	ab	0,40	-2,24	1,217	67,34	2,30
	ac	1,555	14,366	8,700	0,193	0,074
B	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	(4.14)	(4.15)
	ba	0,44902	1,113	0,017	0,187	0,159
	bb	-1,84E-01	3,54E-03	4,82E-04	-2,57E-03	3,66E-04
	bc	-0,029	-0,014	-4,13E-06	0,618	-0,005
C	Gleichung	(4.14)	(4.15)	(4.16)	-	-
	ca	0,636	2,317	0,219	-	-
	cb	5,00E-06	6,42E-03	-2,78E-04	-	-
	cc	2,29848	-0,01714	1,03E-06	-	-

Tabelle A.10: Parametersätze für den LN-Ansatz nach Gleichung (4.17) zur dehnratenabhängigen Beschreibung der Gleichmaßdehnung.

LN-Ansatz, Gl. (4.17)			
Material	ga	gb	gc
B	0,1230	-5,38E-05	-0,0039
CL	0,1299	-4,04E-05	-0,0023
CQ	0,1294	-1,64E-05	-0,0030
D	0,1287	-7,17E-06	-0,0022
H	0,1299	-1,18E-05	-0,0031

Tabelle A.11: Parametersätze für den Potenzansatz nach Gleichung (4.4) zur Beschreibung der Entwicklung der Dehnratenempfindlichkeit m_e über die quasistatische untere Streckgrenze und die Kerbschlagarbeit KV(-20°C).

	ma	mb	mc
Quasistatische untere Streckgrenze	0,0126	3,599E+13	-5,702
Kerbschlagarbeit KV(-20°C)	0,0467	4,672E-02	-1,312

A.2 Übersicht der bestimmten Festigkeits- und Verformungskennwerte

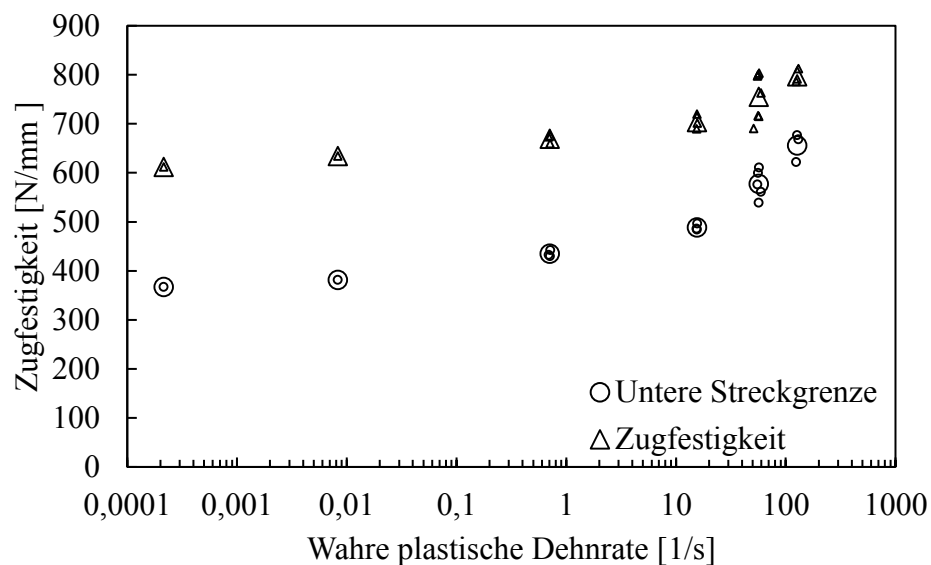


Abbildung A.1: Entwicklung der unteren Streckgrenze und der Zugfestigkeit über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material B - S355J2+N.

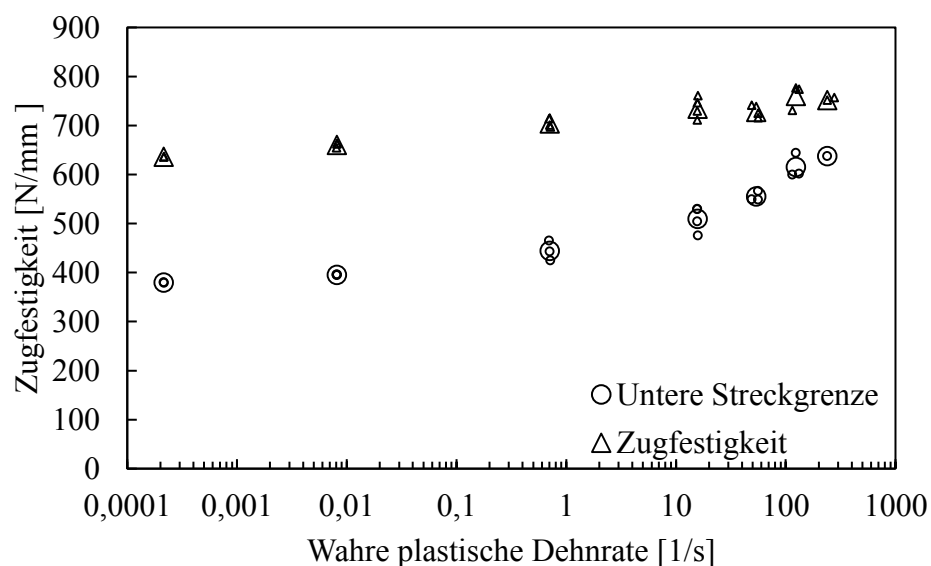


Abbildung A.2: Entwicklung der unteren Streckgrenze und der Zugfestigkeit über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

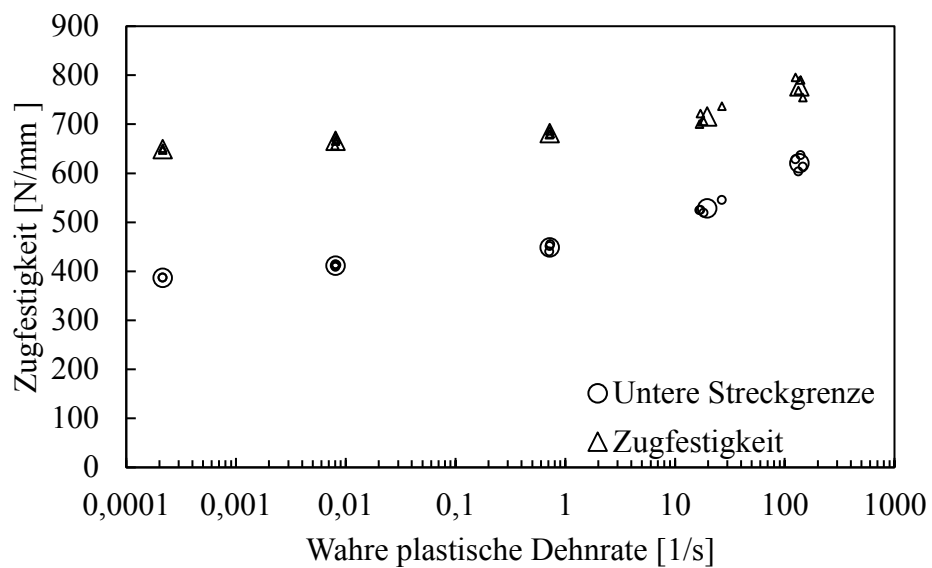


Abbildung A.3: Entwicklung der unteren Streckgrenze und der Zugfestigkeit über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CQ - S355J2+N.

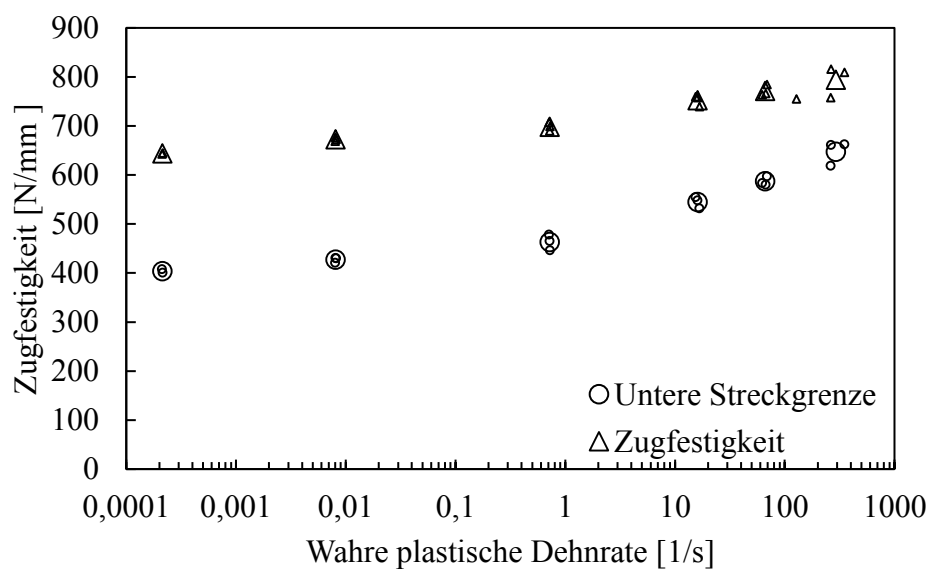


Abbildung A.4: Entwicklung der unteren Streckgrenze und der Zugfestigkeit über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material D - S355J2+N.

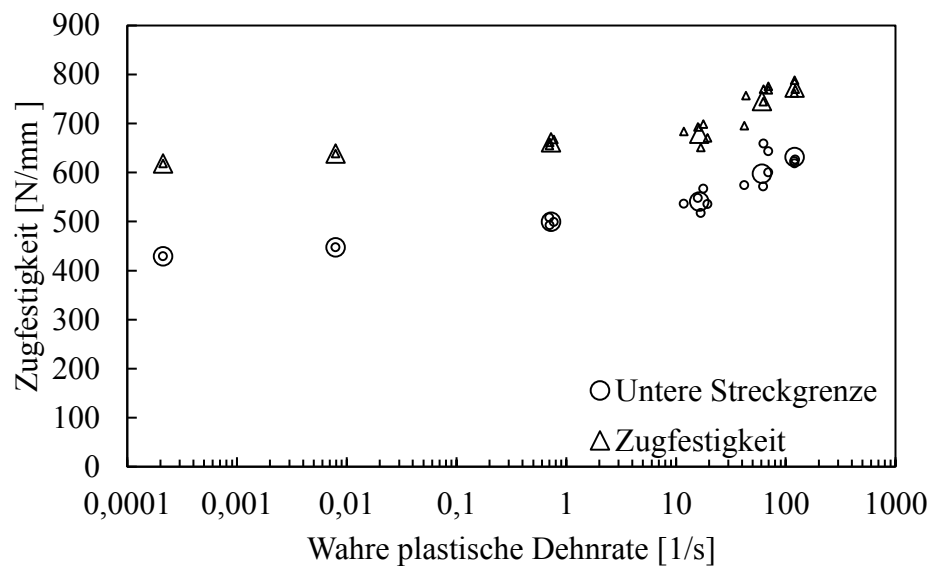


Abbildung A.5: Entwicklung der unteren Streckgrenze und der Zugfestigkeit über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material H - S355ML.

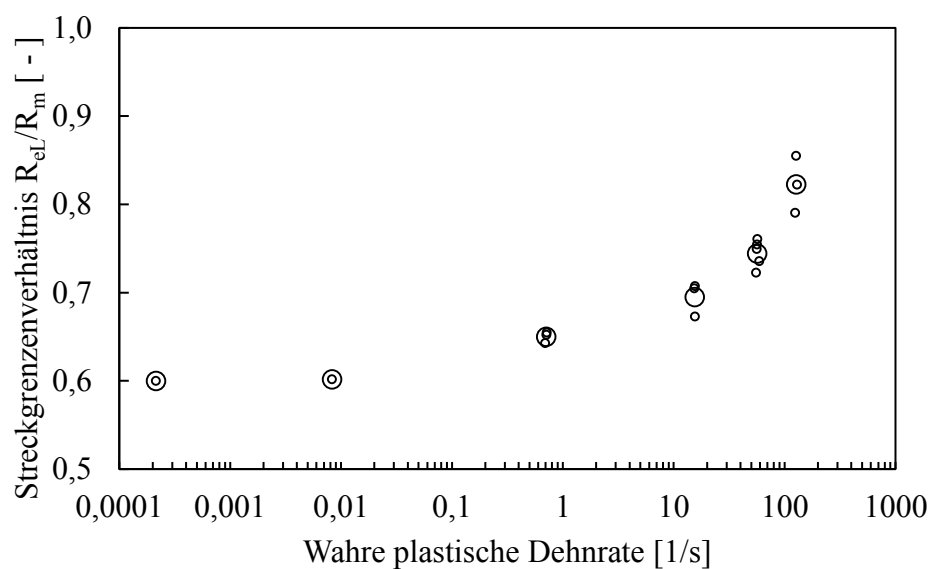


Abbildung A.6: Entwicklung des Streckgrenzenverhältnisses R_{eL} / R_m über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material B - S355J2+N.

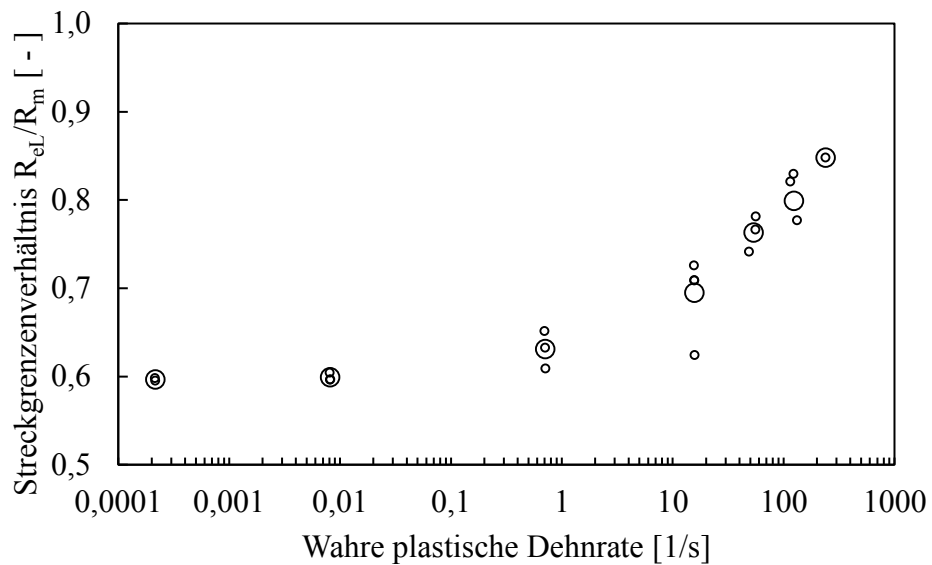


Abbildung A.7: Entwicklung des Streckgrenzenverhältnisses R_{eL} / R_m über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

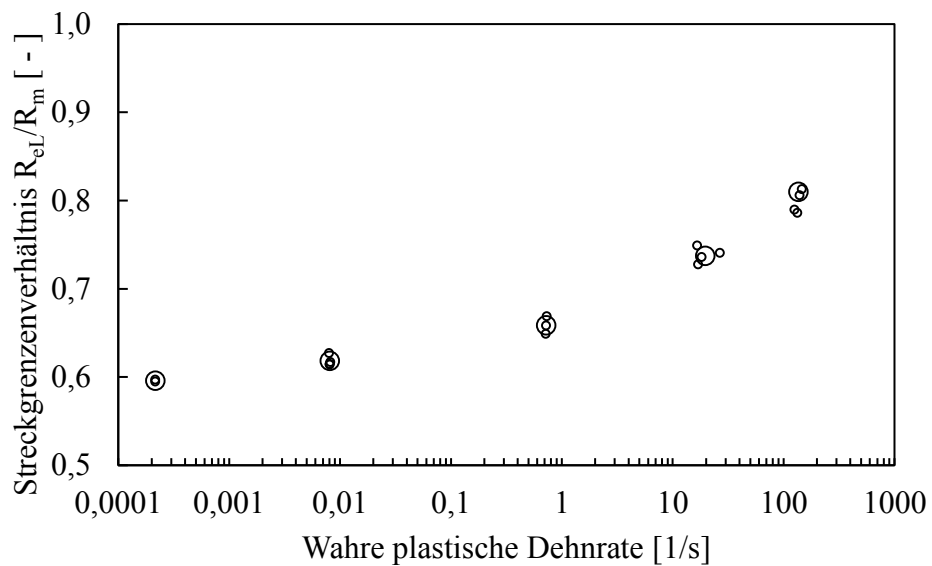


Abbildung A.8: Entwicklung des Streckgrenzenverhältnisses R_{eL} / R_m über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CQ - S355J2+N.

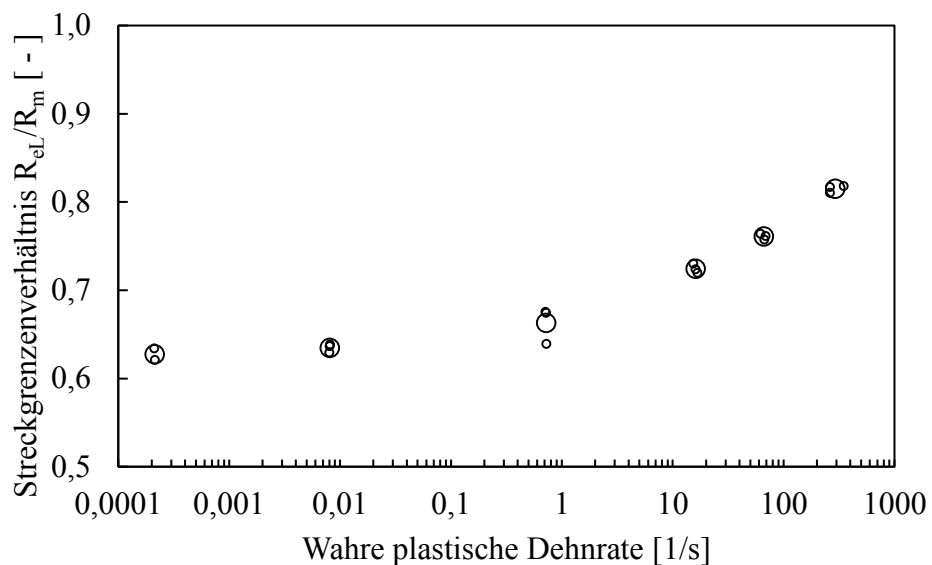


Abbildung A.9: Entwicklung des Streckgrenzenverhältnisses R_{eL} / R_m über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material D - S355J2+N.

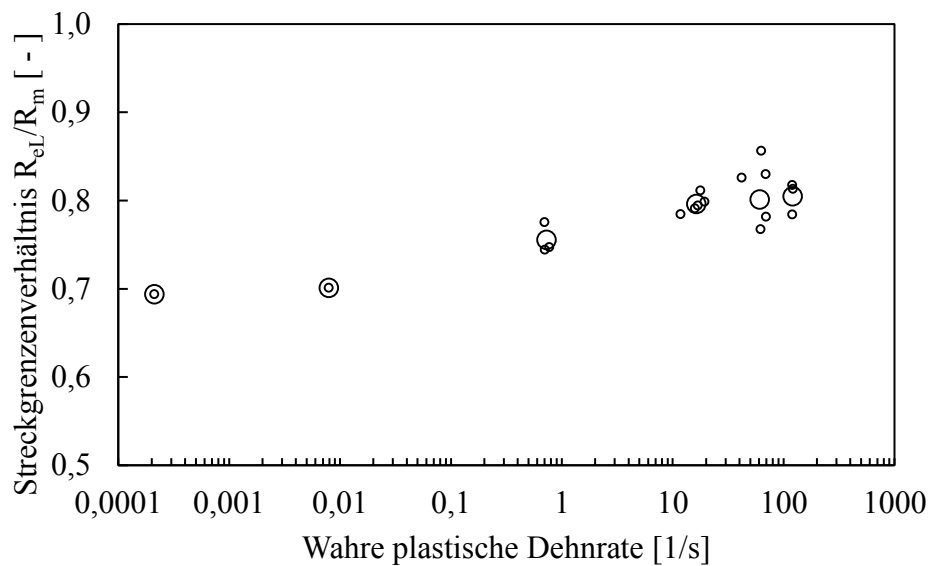


Abbildung A.10: Entwicklung des Streckgrenzenverhältnisses R_{eL} / R_m über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material H - S355ML.

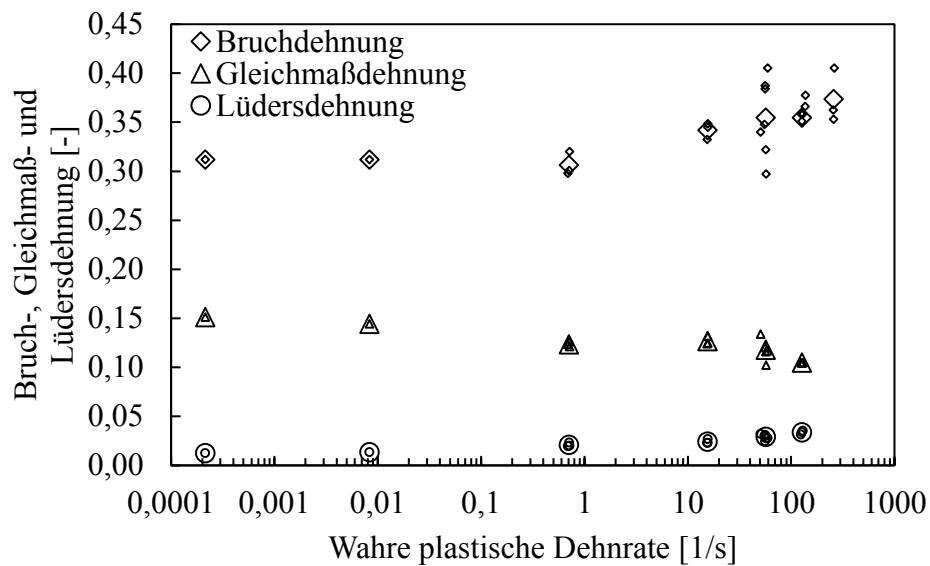


Abbildung A.11: Entwicklung der Lüders-, Gleichmaß- und Bruchdehnung über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material B - S355J2+N.

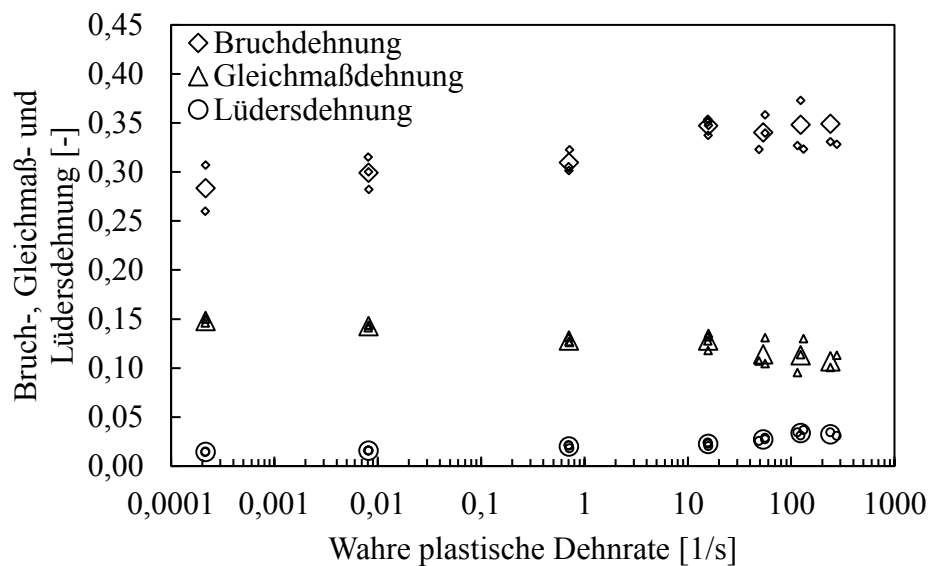


Abbildung A.12: Entwicklung der Lüders-, Gleichmaß- und Bruchdehnung über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CL - S355J2+N.

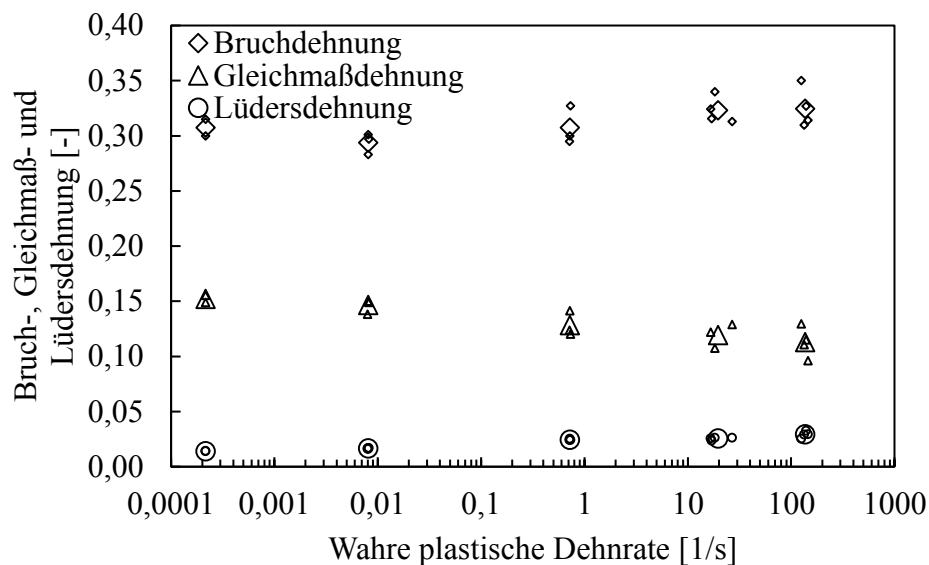


Abbildung A.13: Entwicklung der Lüders-, Gleichmaß- und Bruchdehnung über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material CQ - S355J2+N.

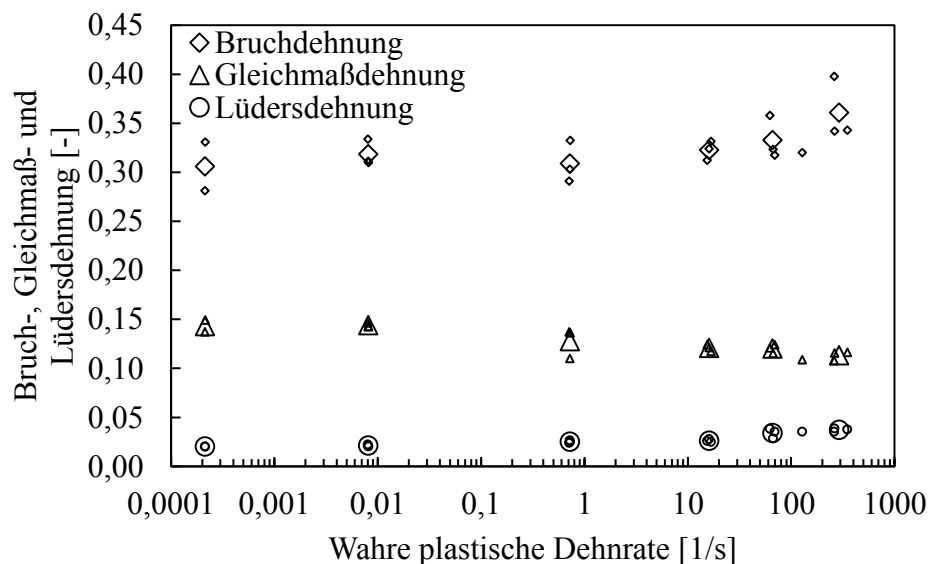


Abbildung A.14: Entwicklung der Lüders-, Gleichmaß- und Bruchdehnung über die wahre plastische Dehnrates. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material D - S355J2+N.

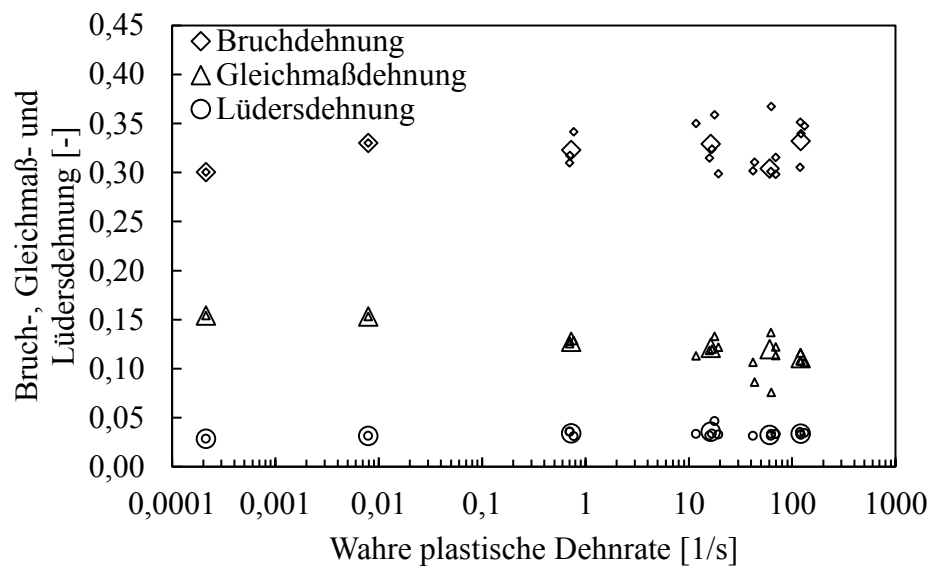


Abbildung A.15: Entwicklung der Lüders-, Gleichmaß- und Bruchdehnung über die wahre plastische Dehnrade. Darstellung der Einzel- und Mittelwerte als kleine und große Symbole. Material H - S355ML.

A.3 Dehnratenabhängige Beschreibung der unteren Streckgrenze

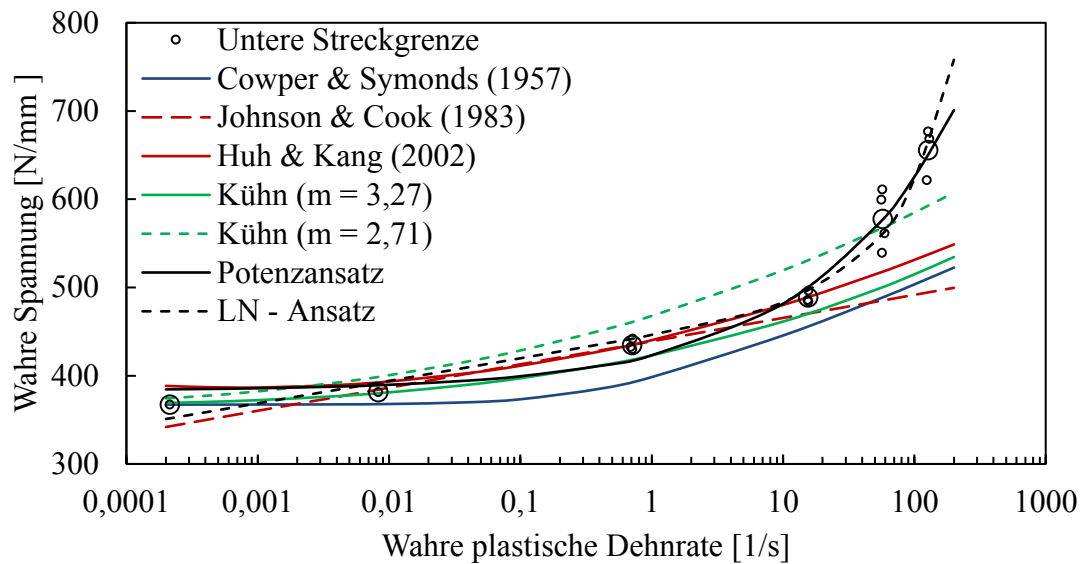


Abbildung A.16: Übersicht der verwendeten Modelle zur dehnratenabhängigen Beschreibung der unteren Streckgrenze. Material B - S355J2+N.

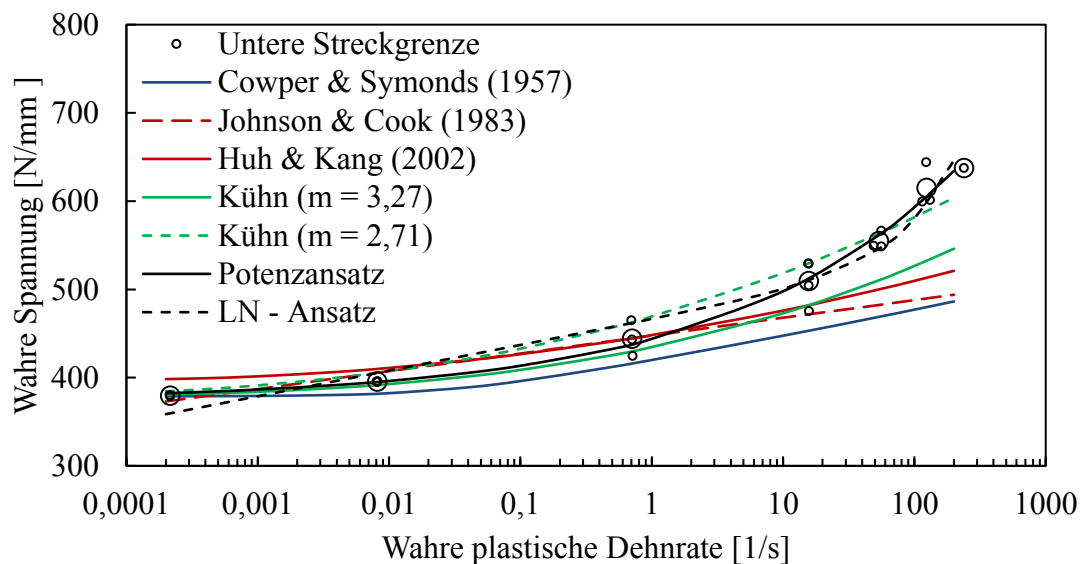


Abbildung A.17: Übersicht der verwendeten Modelle zur dehnratenabhängigen Beschreibung der unteren Streckgrenze. Material CL - S355J2+N.

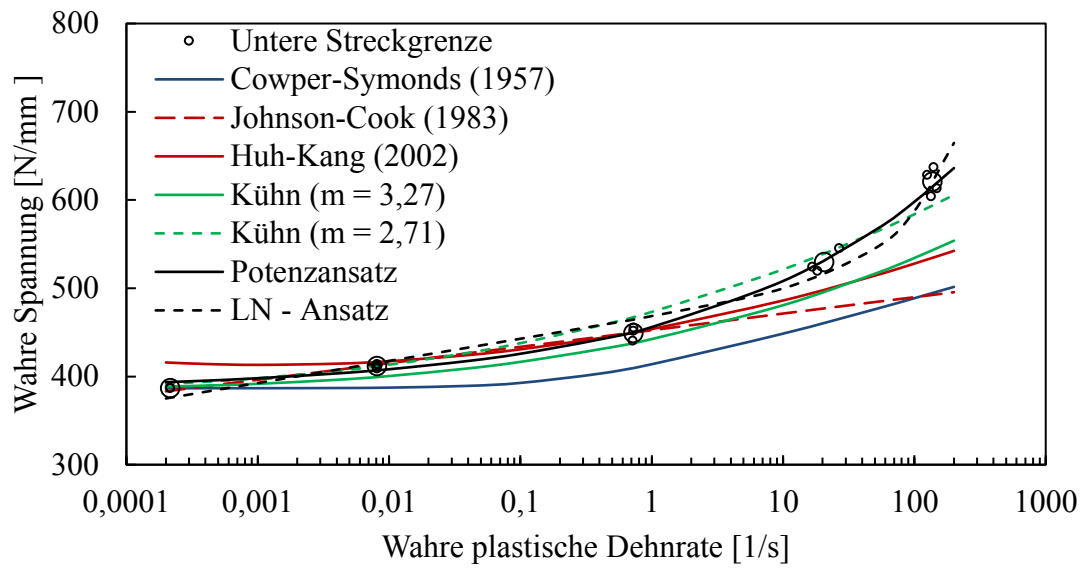


Abbildung A.18: Übersicht der verwendeten Modelle zur dehnratenabhängigen Beschreibung der unteren Streckgrenze. Material CQ - S355J2+N.

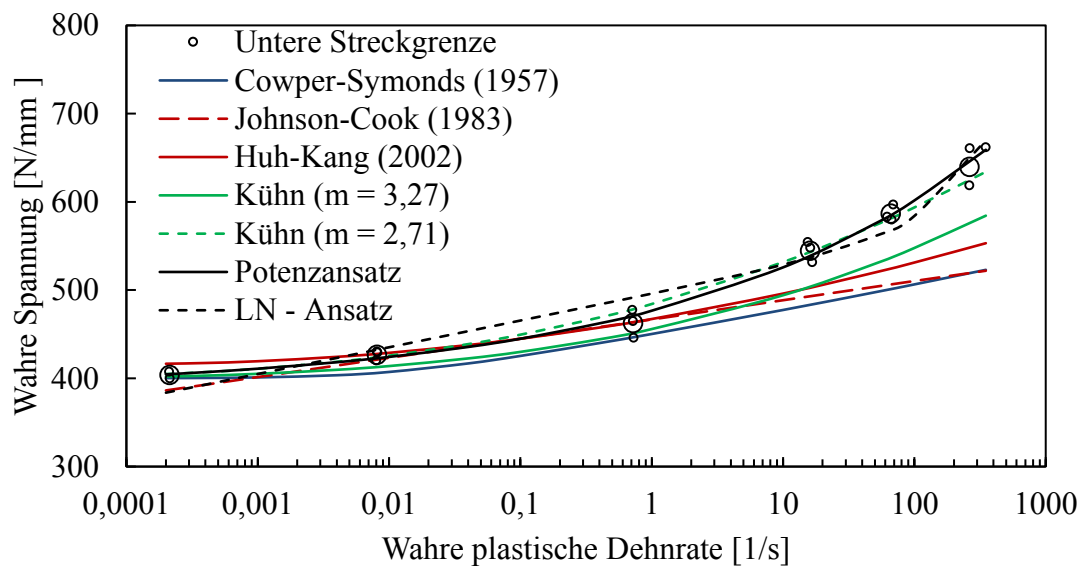


Abbildung A.19: Übersicht der verwendeten Modelle zur dehnratenabhängigen Beschreibung der unteren Streckgrenze. Material D - S355J2+N.

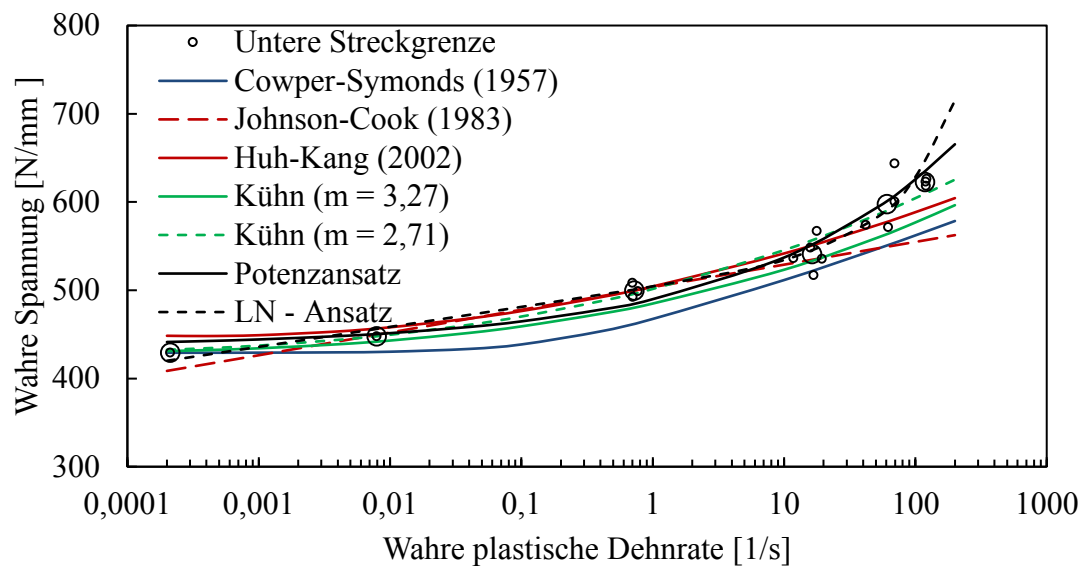


Abbildung A.20: Übersicht der verwendeten Modelle zur dehnratenabhängigen Beschreibung der unteren Streckgrenze. Material H - S355ML.

A.4 Dehnratenabhängige Beschreibung der Fließkurven

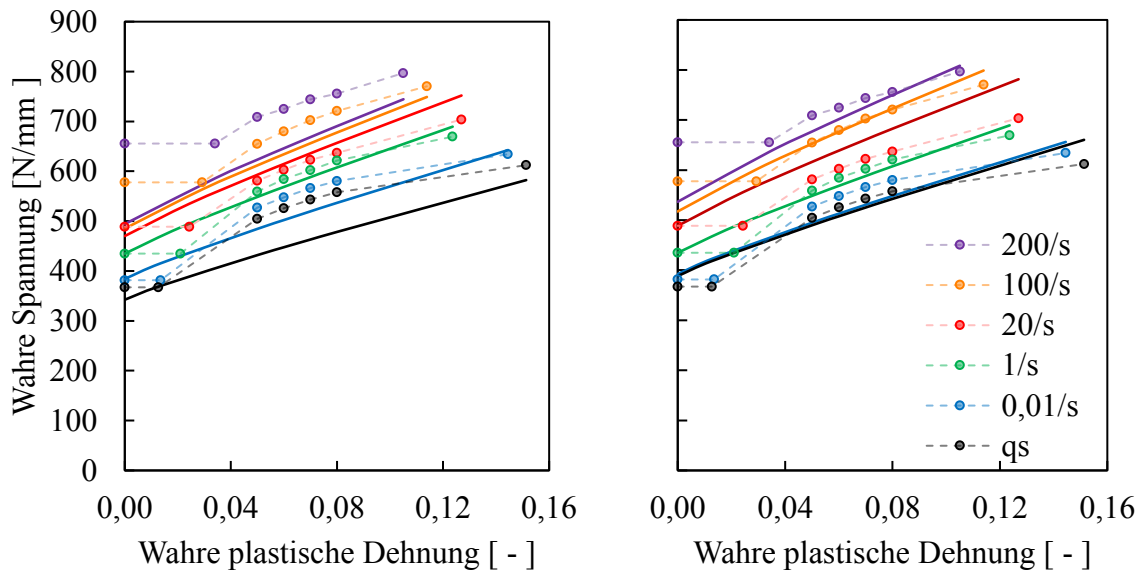


Abbildung A.21: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe der Modelle nach Johnson & Cook (links) und Huh & Kang (rechts). Material B - S355J2+N.

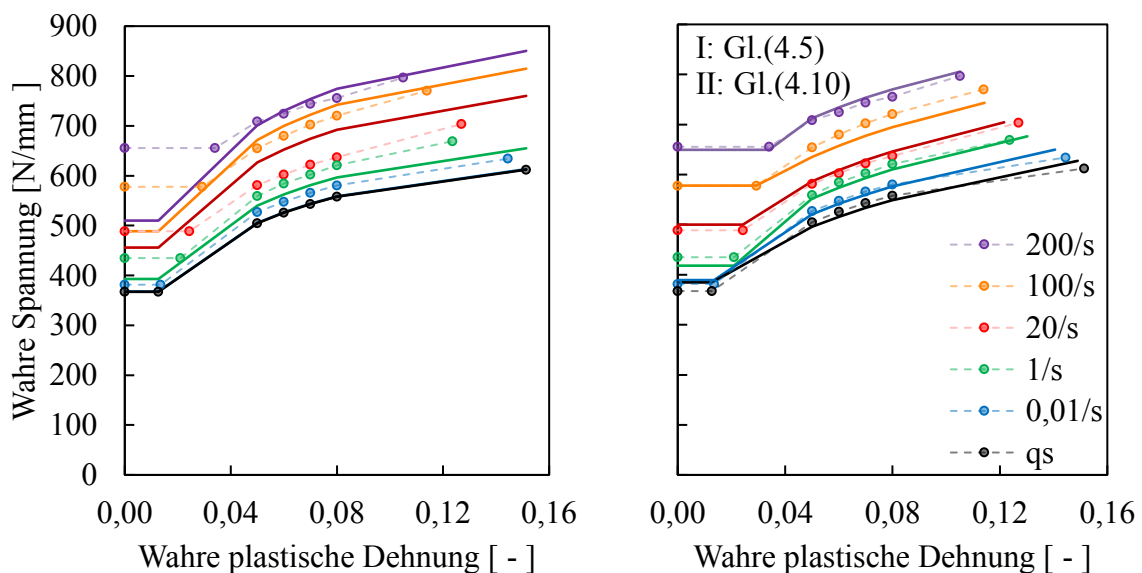


Abbildung A.22: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe des Modells nach Cowper & Symonds (links) und des neuen Modells (rechts). Material B - S355J2+N.

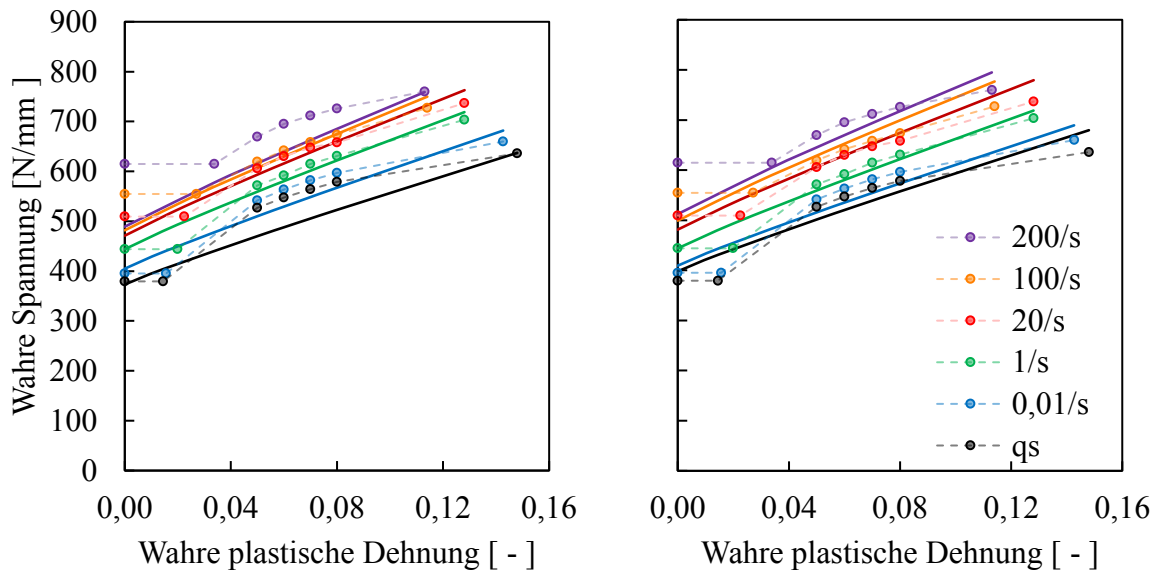


Abbildung A.23: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe der Modelle nach Johnson & Cook (links) und Huh & Kang (rechts). Material CL - S355J2+N.

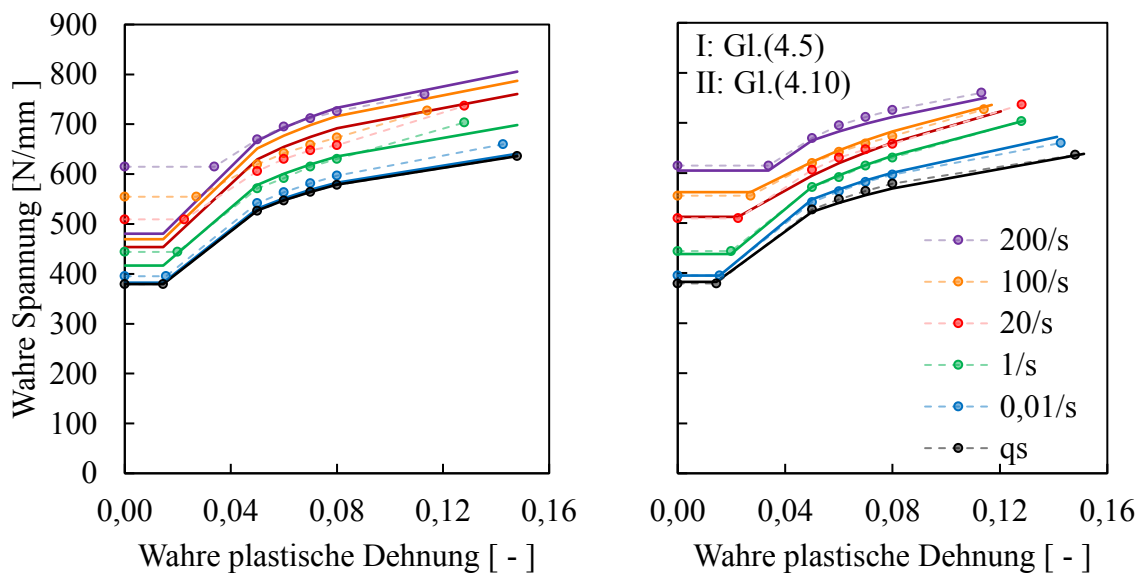


Abbildung A.24: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe des Modells nach Cowper & Symonds (links) und des neuen Modells (rechts). Material CL - S355J2+N.

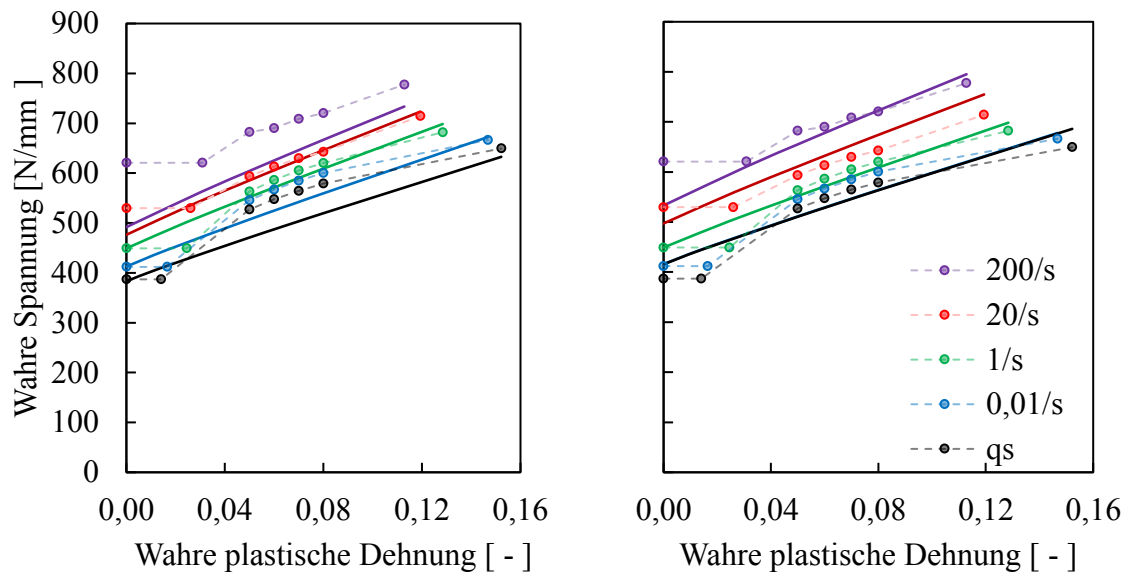


Abbildung A.25: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe der Modelle nach Johnson & Cook (links) und Huh & Kang (rechts). Material CQ - S355J2+N.

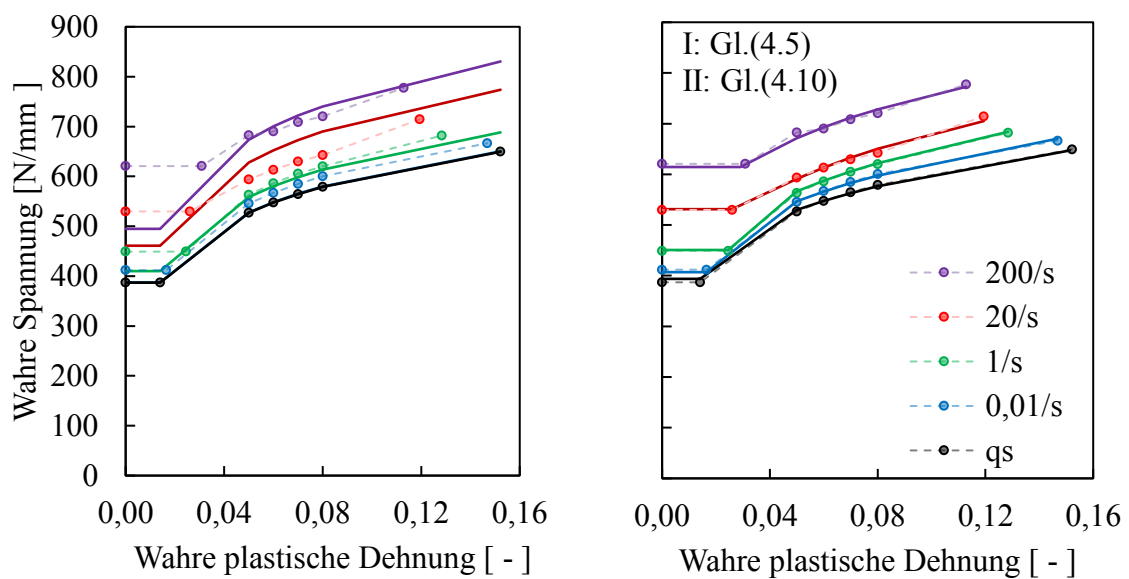


Abbildung A.26: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe des Modells nach Cowper & Symonds (links) und des neuen Modells (rechts). Material CQ - S355J2+N.

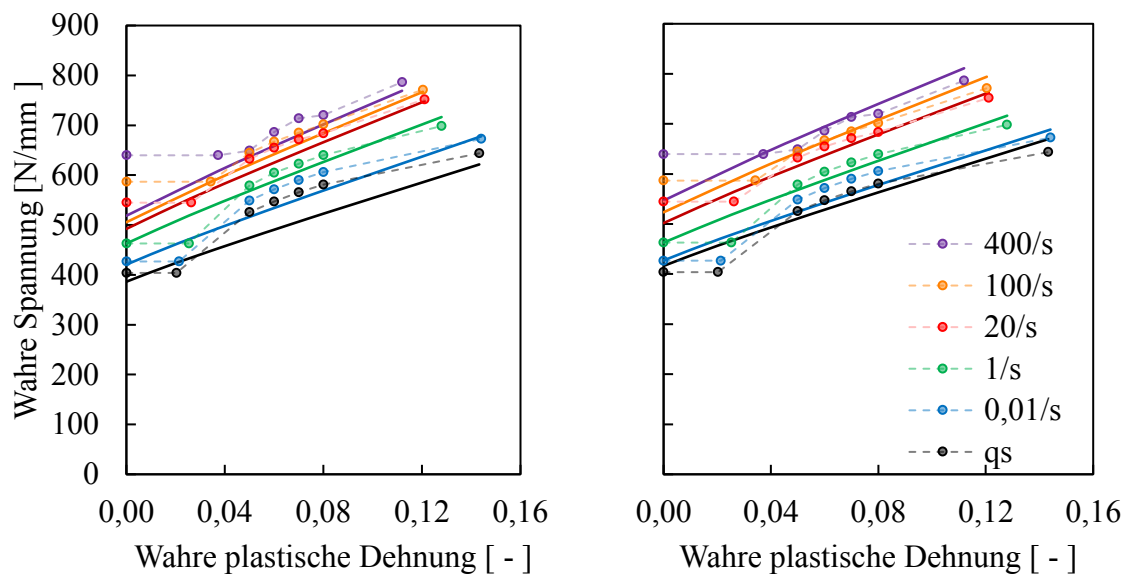


Abbildung A.27: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe der Modelle nach Johnson & Cook (links) und Huh & Kang (rechts). Material D - S355J2+N.

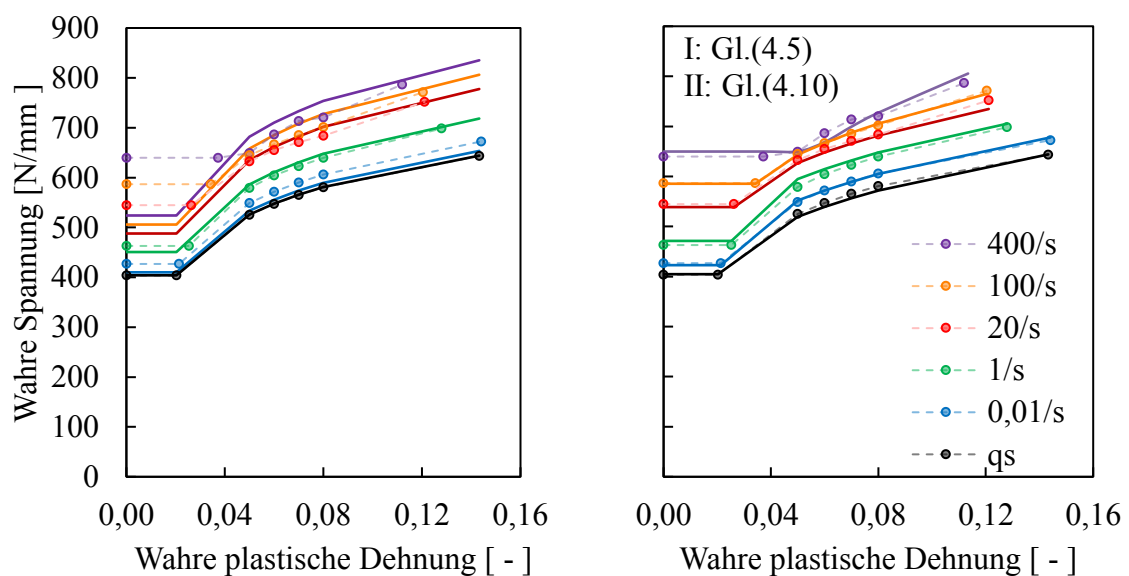


Abbildung A.28: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe des Modells nach Cowper & Symonds (links) und des neuen Modells (rechts). Material D - S355J2+N.

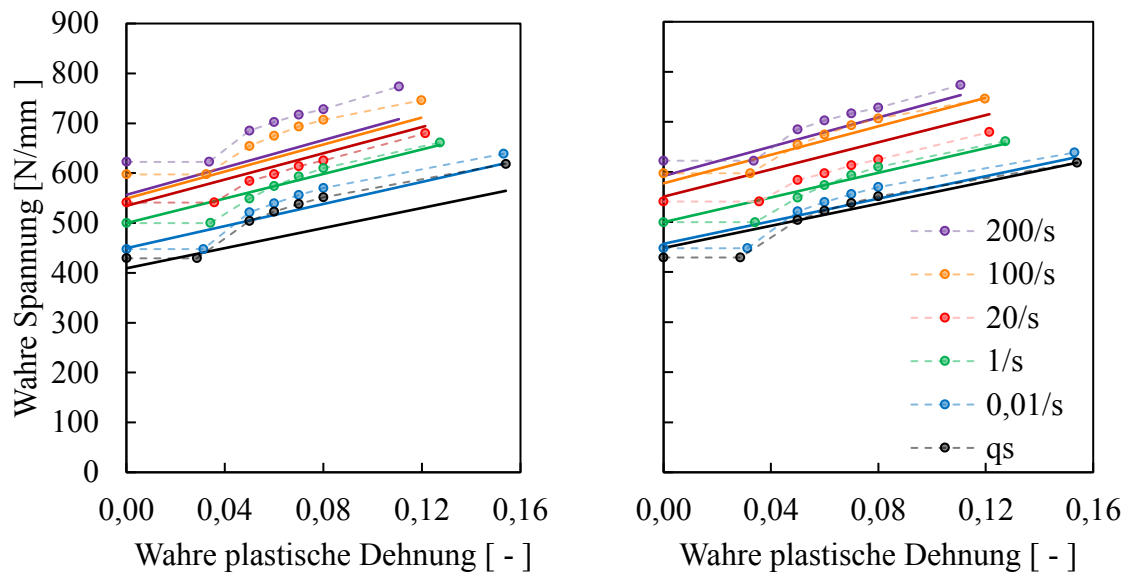


Abbildung A.29: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe der Modelle nach Johnson & Cook (links) und Huh & Kang (rechts). Material H - S355ML.

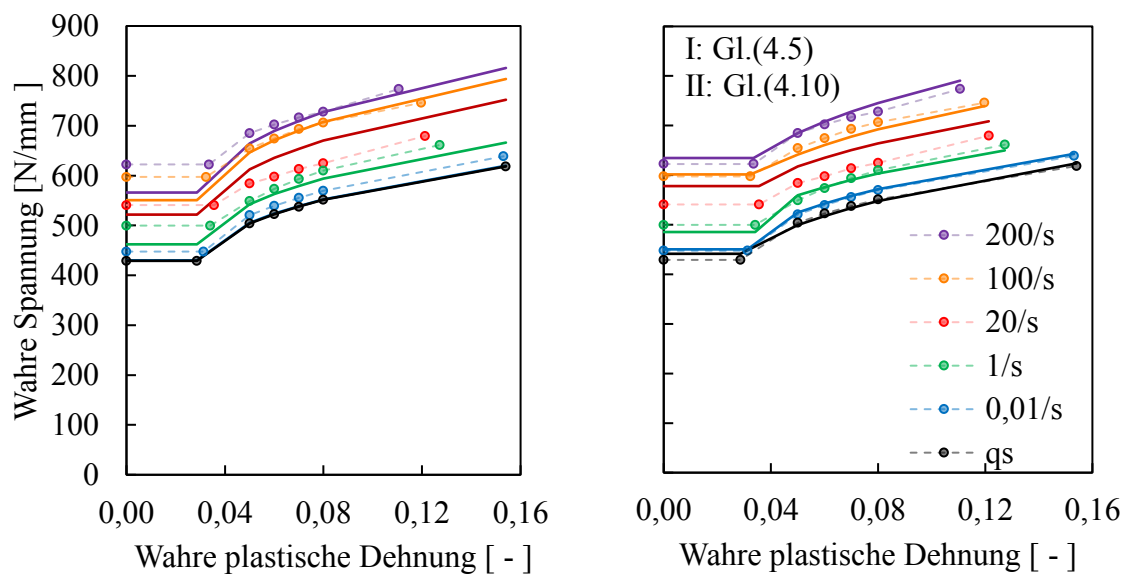


Abbildung A.30: Approximation der idealisierten Fließkurvenschar mithilfe des Modells nach Cowper & Symonds (links) und des neuen Modells (rechts). Material H - S355ML.